

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації
(повна назва)

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Система виявлення дронів в тепловому інфрачервоному діапазоні.

(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи МІМ-21-1
Кутєпов А.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та
радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Олейніков В.М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри Володимир КАРТАШОВ
(підпис)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет інформаційних радіотехнологій та технічного захисту інформації

Кафедра медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Кутепову Антону Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система виявлення дронів в тепловому інфрачервоному діапазоні.

затверджена наказом по університету від " 24 " 10 2022 р. № 1384 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Діапазон довжин хвиль – 3-5 мкм, 8-14 мкм. Площа малого БПЛА – не більше 0,5 м². Мінімальний температурний контраст – 0,5 К. Максимальна роздільна здатність тепловізора – 640x480. Частота кадрів – 25 к/с. Чутливість тепловізора – не гірше 50 мК. Виконати розрахунок дальності дії тепловізора. Розрахувати характеристики тепловізійної системи для виявлення, розпізнавання і ідентифікації БПЛА. Дослідити ефективності виявлення малих дронів у інфрачервоному діапазоні за допомогою нейронних мереж YOLOv5: розробити методика дослідження, отримати результати експерименту та виконати їх обговорення.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Аналітичний огляд загальних принципів тепловачення

2. Розрахунок параметрів системи виявлення дронів в тепловому інфрачервоному діапазоні.

3. Оцінка ефективності виявлення малих дронів у інфрачервоному діапазоні за допомогою нейронних мереж YOLOv5.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням обов'язкових креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

1. Правопорушення з використанням БПЛА (1 аркуш А4).
2. Методи виявлення БПЛА (1 аркуш А4).
3. Постановка задачі (1 аркуш А4).
4. Виявлення БПЛА в тепловізійному каналі (1 аркуш А4).
5. Чутливість і дальність дії системи (1 аркуш А4).
6. Функції виявлення тепловізійного каналу (1 аркуш А4).
7. Вплив роздільної здатності системи (1 аркуш А4).
8. Підготовка теплових зображень дронів (1 аркуш А4).
9. Дослідження нейронної мережі (1 аркуш А4).
10. Висновки (1 аркуш А4).

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	01.09.22–13.09.22	
2	Розрахунок чутливості системи	14.09.22–27.09.22	
3	Розрахунок роздільної здатності системи	28.09.22–11.10.22	
4	Експериментальна частина	12.10.22–25.10.22	
5	Обробка результатів	26.10.22–10.11.22	
6	Графічна частина роботи	11.11.22–25.11.22	
7	Перевірка керівником	26.11.22–02.12.22	
8	Перевірка на академічний плагіат	03.12.22	
9	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	04.12.22–07.12.22	

Дата видачі завдання _____ 01.09.2022 р. _____

Студент _____ Антон КУТЄПОВ _____
(підпис)

Керівник роботи _____ Володимир ОЛЕЙНІКОВ _____
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 65 сторінок, 24 рисунки, 3 таблиці, 31 джерело.

БПЛА, ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ-ФОН, ВИЯВЛЕННЯ, ДРОН, ІНФРАЧЕРВОНИЙ, ОСВІТЛЕНІСТЬ, ТЕПЛОВІЗОР, ЧУТЛИВІСТЬ

Об'єкт дослідження – приймання і обробка сигналів теплового інфрачервоного діапазону в задачах виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих БПЛА.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності дії тепловізійного каналу з врахуванням чутливості і роздільної здатності системи, оцінити ефективність виявлення малих дронів в тепловізійному каналі методом YOLOv5 з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, статистична обробка даних.

В кваліфікаційній роботі проведено аналітичний огляд загальних принципів теплобачення. Виконано розрахунок параметрів системи виявлення дронів в тепловому інфрачервоному діапазоні: проведено розрахунок чутливості і дальності дії тепловізійного каналу, а також розрахунок роздільної здатності тепловізійного каналу. Проведена оцінка ефективності виявлення малих дронів у інфрачервоному діапазоні за допомогою нейронних мереж YOLOv5: розроблена методика дослідження, отримані результати експерименту та виконано їх обговорення.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 65 pages, 24 figures, 3 tables, 31 sources.

UAV, SIGNAL-BACKGROUND RATIO, DETECTION, DRONE, INFRARED, LIGHT, THERMAL IMAGING, SENSITIVITY

The object of the research is the reception and processing of signals of the thermal infrared range in the tasks of detection, recognition and identification of small UAVs.

The purpose of the study is to obtain numerical estimates of the range of the thermal imaging channel, taking into account the sensitivity and resolution of the system, to evaluate the effectiveness of detecting small drones in the thermal imaging channel using the YOLOv5 method, taking into account the characteristics of the target and background radiation.

Research methods – theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling, statistical data processing.

In the qualification work, an analytical review of the general principles of thermal imaging was carried out. The parameters of the drone detection system in the thermal infrared range were calculated: the sensitivity and range of the thermal imaging channel were calculated, as well as the resolution of the thermal imaging channel was calculated. An assessment of the effectiveness of detecting small drones in the infrared range using YOLOv5 neural networks was carried out: a research methodology was developed, the results of the experiment were obtained and their discussion was carried out.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	8
Вступ.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ ТЕПЛОБАЧЕННЯ.....	11
1.1 Терміни та визначення.....	11
1.2 Загальні положення.....	12
1.3 Застосування теплобачення.....	15
1.4 Теоретичні розрахунки теплового випромінювання.....	16
1.5 Проходження інфрачервоного випромінювання крізь атмосферу.....	20
1.6 Вплив атмосферних утворень і атмосферних газів.....	23
1.7 Концепція комплексування тепловізійних каналів.....	26
1.8 Висновки по розділу 1.....	28
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ В ТЕПЛОВОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ.....	29
2.1 Розрахунок чутливості і дальності дії тепловізійного каналу.....	29
2.2 Розрахунок роздільної здатності тепловізійного каналу.....	35
2.3 Висновки по розділу 2.....	42
3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛИХ ДРОНІВ У ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ YOLOv5.....	44
3.1 Постановка задачі.....	44
3.2 Архітектура нейронних мереж YOLOv5.....	45
3.3 Методика дослідження.....	47
3.4 Результати експерименту та їх обговорення.....	51
3.4 Висновки по розділу 3.....	57
Висновки.....	59

Перелік джерел посилань.....	63
ДОДАТКИ.....	66
Додаток А. Графічний матеріал.....	67
Додаток В. Відомість кваліфікаційної роботи.....	77

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

FPA (Focal Plate Area) – фокально-площинний («одночасно дивлячийся») приймач випромінювання;

FLIR (Forward Looking Infrared) – «дивлячяся» інфрачервона (система);

MWIR (Middle Wave Infrared) – середньохвильове інфрачервоне випромінювання;

NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – температурна чутливість;

LWIR (Long Wave Infrared) – довгохвильове інфрачервоне випромінювання;

VLWIR – наддовгохвильове інфрачервоне випромінювання;

NEP (Noise-Equivalent Power) – потужність, еквівалентна шуму;

SWIR (Short-wave infrared) – короткохвильове інфрачервоне випромінювання;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

АЧТ – абсолютно чорне тіло;

ЕОП – електронно-оптичний перетворювач;

ІЧ – інфрачервоний;

КА – космічний апарат;

МФС – міжнародна фотометрична система;

МФП – матричні фотоприймачі;

ТГц – терагерцовий;

ТПВ – тепловізор;

ТПС – тепловізійна система.

ВСТУП

З появою середніх та малих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завдання протидії їх застосуванню у особливо контрольованих зонах суттєво актуалізувалися. Починаючи з середини 2000-х років у засобах масової інформації стали регулярно з'являтися повідомлення про небезпечне використання малих БПЛА в районах аеропортів, а з середини 2010-х – про застосування малих БПЛА для ведення несанкціонованого спостереження важливих об'єктів, проведення терактів та диверсій, перенесення заборонених вантажів (зброї, наркотиків) та широкому використанні БПЛА у військовій справі.

У зв'язку з цим на Заході почалася активна наукова розробка цього напрямку досліджень. При цьому дана проблематика є відносно новою, оскільки рання з робіт з тематики протидії БПЛА відноситься до 2008 р., а початок активних наукових публікацій з цієї тематики відноситься до 2016-2017 рр. У результаті до 2020 р. у Західній науковій пресі було введено відносно усталені терміни, а також визначено основні напрямки досліджень у цієї предметної галузі:

- "протидія БПЛА" – використовуються такі терміни як "C-UAV", "CUAV", "C-UAVs", "CUAVs" (Counter Unmanned Aerial Vehicles);
- "Системи протидії БПЛА" використовуються такі терміни як "C-UAS", "CUAS" (Counter Unmanned Aircraft Systems), "C-UAV system", "CUAV-system", "AUDS" (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems;
- "технології протидії БПЛА" використовуються такі терміни як "Anti-Drone Technologies" та "Counter-UAVs Technologies".

Найбільше складними об'єктами виявлення, для сучасних засобів розвідки та контролю повітряного простору є малі БПЛА. Для виявлення малих БПЛА використовують засоби радіолокаційної, радіо- та радіотехнічної, оптико-електронної та акустичної розвідок.

В даній роботі тепловізійний канал розглядається як один з каналів у комплексній системі виявлення, розпізнавання, ідентифікації і пеленгації малих БПЛА.

Об'єкт дослідження – приймання і обробка сигналів теплового інфрачервоного діапазону в задачах виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих БПЛА.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності дії тепловізійного каналу з врахуванням чутливості і роздільної здатності системи, оцінити ефективність виявлення малих дронів в тепловізійному каналі методом YOLOv5 з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання, статистична обробка даних.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЗАГАЛЬНИХ ПРИНЦИПІВ ТЕПЛОБАЧЕННЯ

1.1 Терміни та визначення

В роботі будемо застосовувати наступні терміни з відповідними визначеннями.

Тепловізійний вимірювальний прилад (тепловізор) – оптико-електронний прилад, призначений для безконтактного (дистанційного) спостереження, вимірювання та реєстрації просторового / просторово-часового розподілу радіаційної температури об'єктів, що знаходяться в полі зору приладу, шляхом формування тимчасової послідовності термограм та визначення температури [1] поверхні об'єкта за відомих коефіцієнтів випромінювання та параметрів зйомки (температура навколишнього середовища, пропускання атмосфери, дистанція спостереження та т.ін.).

Еталонний (зразковий) випромінювач – випромінювач у вигляді моделі абсолютно чорного тіла (АЧТ).

Еталонний (зразковий) протяжний випромінювач – еталонний (зразковий) випромінювач, кутові розміри якого у 10 і більше разів перевищують елементарне поле зору тепловізора.

Тепловий тест-об'єкт – пристрій, призначений для створення картинної площини, що містить тепловипромінюючий об'єкт із заданими просторовою частотою або формою, температурним контрастом на рівномірно випромінюючому фоні з відомим значенням його температури і випромінювальними здібностями об'єкта та фону.

Термограма – багатоелементне двовимірне зображення, кожному елементу якого приписується колір, або градація одного кольору, або градація яскравості екрана, що визначаються відповідно до умовної температурною шкали.

Кількість чутливих елементів (елементів розкладення термограми) – кількість фоточутливих елементів у фотоприймальному пристрої тепловізора.

Кут поля зору – просторовий кут, в межах якого здійснюється формування термограми.

Елементарне поле зору (миттєвий кут поля зору) – просторовий кут, в межах якого інфрачервоне випромінювання сприймається одним фоточутливим елементом фото приймального пристрою.

Просторове (кутове) розрізнення – розмір (кутовий або в елементах розкладання) щілини в екрані, встановленому перед протяжним випромінювачем у полі зору тепловізора, при якому відношення пікового збільшення температури щілини над температурою екрану на термограмі до різниці температур випромінювача та екрану досягає заданого значення.

Поріг температурної чутливості (різниця температур, еквівалентна шуму) – збільшення температури, що дорівнює середньоквадратичному значенню шуму в термограмі при спостереженні однорідного фону із заданою температурою.

Нерівномірність чутливості тепловізора по полю – максимальне значення перепаду температур фрагментів термограми рівновипромінюючого по поверхні еталонного (зразкового) протяжного випромінювача.

1.2 Загальні положення

Енергетичні співвідношення в оптико-електронних приладах з використанням напівпровідникових приймачів випромінювання та оптикомеханічного сканування досить докладно викладено у ряді монографій, наприклад, у книзі Дж. Ллойда [1]. У ній виконані систематизація та аналіз цих даних.

Можуть бути рекомендовані інші роботи: [2-4], і більше пізні роботи [5-7] та багато інших.

Тепловізори (ТпВ) відносяться до оптико-електронних приладів пасивного типу, що працює в інфрачервоному (ІЧ) діапазоні спектру випромінювання.

Теплобачення – це напрям у технічних вимірюваннях, вивчає фізичні основи, методи та прилади, що забезпечують можливість спостереження слабонагрітих об'єктів. Ці прилади називаються тепловізорами (термографами).

В даний час розроблено та активно використовується велика кількість ТпВ середньохвильового та довгохвильового ІЧ піддіапазонів. Починається активна розробка приладів ближнього та короткохвильового ІЧ піддіапазонів, проте широкого поширення вони поки не отримали.

В останні роки інтенсивно розвивається напрямок створення комбінованих та комплексованих приладів, що поєднують у своєму складі кілька каналів прийому теплового випромінювання. Так, роботи ведуться по побудові ТПВ, чутливих до ІЧ середньохвильовому вікні прозорості атмосфери (табл. 1.1) та в довгохвильовому.

Особливий інтерес проявляється до розробки ТПВ, чутливих як у довгохвильовому вікні прозорості атмосфери, так і в терагерцевому (ТГц) діапазоні.

У системах безпеки переважно використовуються ТПВ довгохвильового ІЧ піддіапазону. Це пов'язано з технічними особливостями (більшість тепловізорів MWIR – охолоджувані) та фізичними причинами (в LWIR знаходиться максимум випромінювання тіл при кімнатній температурі). Перші тепловізійні системи були створені наприкінці 30-х років ХХ ст.

Початок розвитку тепловізійної техніки було покладено на початку 60-х років ХХ століття дослідженнями та розробкою приладів за двома основними напрямками:

– з використанням дискретних приймачів випромінювання спільно з системами сканування (розгортки) зображення;

– з використанням апаратури без механічного сканування на основі двовимірних ІЧ приймачів.

Таблиця 1.1 – Діапазони ІЧ випромінювання

Довжина хвилі, мкм	Назва
0,76-1,5	Ближнє інфрачервоне випромінювання
1,5-2,2	Короткохвильове інфрачервоне випромінювання (SWIR)
2,2-5,6	Середньохвильове інфрачервоне випромінювання (MWIR)
5,6-30	Довгохвильове інфрачервоне випромінювання (LWIR)
30-300	Дальнє інфрачервоне випромінювання (ТГц)

Скануючі системи тепловачення використовують різні типи сканування: одноелементне, паралельне та послідовне.

Сканування може проводитись як у просторі предметі (об'єктів), так і їх зображень. Розрізняються типи сканування за траєкторіями сканування, закону сканування та інших ознак.

ТпВ без механічного сканування («дивлючогося» типу), спочатку названі FLIR (Forward Looking Infrared) системами, використовують аналогію з органами зору живих істот багатоелементні матричні приймачі оптичного випромінювання (focal plane array – FPA) [5].

Сьогодні можна умовно виділити чотири покоління розвитку такої техніки [8-10]:

- нульове покоління ґрунтується на застосуванні одиничних охолоджуваних приймачів та двовимірної (рядкової та кадрової) розгортки з допомогою скануючої оптико-механічної системи;

- перше покоління – на застосуванні малих лінійок приймачів та спрощеної кадрової розгортки;

- друге покоління – на використанні згрупованих декількох лінійок (з часовою затримкою та накопиченням) та низькошвидкісною системою розгортки; до другого покоління відносять вакуумні прилади з електронним скануванням приймальної мішені – пірокони;

– принципово нове третє покоління ґрунтується на застосуванні "одночасно дивлячих" – фокально-площинних (FPA – Focal Plate Area) та двовимірних твердотільних багатоелементних (матричних) приймачів випромінювання (МПП), тобто без використання оптикомеханічних систем розгорнення.

Спочатку розвиток теплобачення, як і більшості високих технологій, було пов'язано з озброєнням та військовою технікою. Однак бурхливий розвиток теплобачення і, особливо, приладів, що не охолоджуються, його унікальні можливості відкрили йому дорогу до цивільного сектору.

Сьогодні більшість тепловізійних систем (ТПС) по суті є виробами подвійного призначення, тобто можуть використовуватися як військових, і у цивільних цілях. Для озброєння та військової техніки до цього часу застосовуються як скануючі ТПС, і матричні ТПВ.

В останні роки розвиток тепловізійної техніки йде в здебільшого шляхом застосування неохолоджуваних багатоелементних МПП, фізичні характеристики яких дуже високі і практично не поступаються охолодним системам. Сучасні ТПС мають малі масо-габаритні характеристики та енергоспоживання, забезпечують безшумну роботу та високу якість тепловізійного зображення, широкий динамічний діапазон під час роботи в режимі мовного телевізійного стандарту, цифрову обробку у реальному масштабі часу, зв'язок з ЕОМ тощо. і поділяються на два основні класи:

- наглядові (що показують);
- вимірювальні, або радіометричні (термографи).

Структурно пристрій сучасних матричних ТПО не відрізняється від влаштування телевізійних камер на ПЗЗ.

1.3 Застосування теплобачення

Теплобачення знайшло застосування у багатьох сферах людської діяльності. Наприклад, ТПВ застосовуються з метою військової розвідки та

охорони об'єктів. У ручний тепловізійний нічний візор людини можна побачити у повній темряві на відстані 300 м. Об'єкти звичайної військової техніки видно на відстані 2-3 км.

Тепловий контроль заснований на вимірі, моніторингу та аналізі температури об'єктів, що контролюються. Основною умовою застосування теплового контролю є наявність у контрольованому об'єкті теплових потоків. Процес передачі теплової енергії, виділення чи поглинання тепла в об'єкті призводить до того, що його температура змінюється щодо довкілля. Розподіл температури по поверхні об'єкта є основним параметром у тепловому контролі, оскільки несе інформацію про особливості процесу теплопередачі, режим роботи об'єкта, його внутрішній структурі та наявність прихованих внутрішніх дефектів. Теплові потоки в об'єкті, що контролюється, можуть виникати з різних причин.

Основний внесок у спостерігається тепловий контраст вносять власні випромінювання спостережуваного об'єкта та фону. Але в низці ситуацій суттєві зміни контрастів об'єктів зумовлюються не лише власним випромінюванням тіл, а й відбитими від об'єктів (за законами оптики) нагрітими шарами атмосфери при горизонтному спостереженні холодними випромінюваннями зенітних областей заатмосферних випромінювань при спостереженні об'єктів з авіаційних та космічних носіїв. У ряді теплових вимірів необхідно селектувати відбиті складові теплових потоків від контрольованого об'єкта власної температури об'єкта наглядного приладу і навіть власної температури приймача випромінювання. Подібні ситуації враховуються в прецизійних вимірах, при використанні ТПВ у режимі радіометричних (термографічних) досліджень.

1.4 Теоретичні розрахунки теплового випромінювання

Кожен об'єкт з температурою, відмінною від абсолютного нуля, випромінює випромінювання, яке називається тепловим. Нагріті тіла (тверді

та рідкі) характеризуються безперервним розподілом випромінювання по спектру довжин хвиль з єдиним максимумом, положення якого залежить від температури джерела. Такі джерела називають тепловими, а ці тіла зазвичай перебувають у стані термодинамічної рівноваги.

Теплове випромінювання – електромагнітне випромінювання з суцільним спектром, що випускається нагрітими тілами за рахунок їхньої внутрішньої енергії.

Це один із трьох елементарних видів перенесення теплової енергії (крім теплопровідності та конвекції).

У фізиці для розрахунку теплового випромінювання прийнято модель абсолютно чорного тіла (АЧТ), теплове випромінювання якого описується законом Стефана – Больцмана. Випромінювання реальних тіл підпорядковується закону випромінювання Кірхгофа.

Випромінювання полум'я або електричного розряду в газах не безперервне за спектром, а сконцентровано у вузьких інтервалах – лініях та смугах. Такі джерела називають селективними.

Прикладами селективних випромінювачів є смолоскипи двигунів літаків і ракет, а також шари в стрибку ущільнення, що оточують космічний апарат (КА), який повертається в атмосферу і відокремилися боєголовки міжконтинентальних балістичних ракет (МБР).

Фундаментальним поняттям щодо теплового випромінювання є поняття про АЧТ, тобто тіло, що поглинає все, що падає на нього випромінювання будь-яких довжин хвиль. Висновок формул заснований на поданні, що теплове випромінювання генерується в процесі простого гармонічного коливання лінійних атомних осциляторів не безперервним чином, а дискретними квантами, енергія E яких є функцією частоти випромінювання ν :

$$E = h\nu, \quad (1.1)$$

де h – постійна Планка.

Інтенсивність випромінювання абсолютно чорного тіла залежно від температури та частоти визначається законом Планка:

$$I(\nu) = \frac{2h\nu^2}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (1.2)$$

де $I(\nu)d\nu$ – потужність випромінювання на одиницю площі випромінюючої поверхні в діапазоні частот від ν до $\nu d\nu$;

ν – частота випромінювання;

T – температура випромінюючого тіла;

h – постійна Планка ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Вт · с²);

c – швидкість світла у вакуумі ($c = 2,9979 \cdot 10^{10}$ см / с);

k – постійна Больцмана ($k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$ (Вт · с) / К).

Вираз (1.2) еквівалентний

$$u(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^2} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}, \quad (1.3)$$

де $u(\lambda)d\lambda$ або $W_\lambda(T,\lambda)$ – потужність випромінювання на одиницю площі випромінюючої поверхні в діапазоні довжин хвиль від λ до $\lambda + d\lambda$.

Інтегрування рівняння, що описує закон Планка, дає закон Стефана - Больцмана, спочатку отриманий експериментально:

$$W(T) = \int_0^\infty W_\lambda(T,\lambda)d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4. \quad (1.4)$$

Візьмемо похідну від рівняння Планка (1.2), і отримаємо закон зміщення Вина:

$$u_\nu = C_1 \cdot \nu^3 \cdot e^{-C_2 \nu / T}, \quad (1.5)$$

де u_ν – щільність енергії випромінювання;

ν – частота випромінювання;

T – температура випромінюючого тіла;

C_1, C_2 – константи.

Спектральна щільність випромінювання АЧТ у діапазоні температур від 3500 до 5500 К та від 280 до 320 К показана на рис. 1.1.

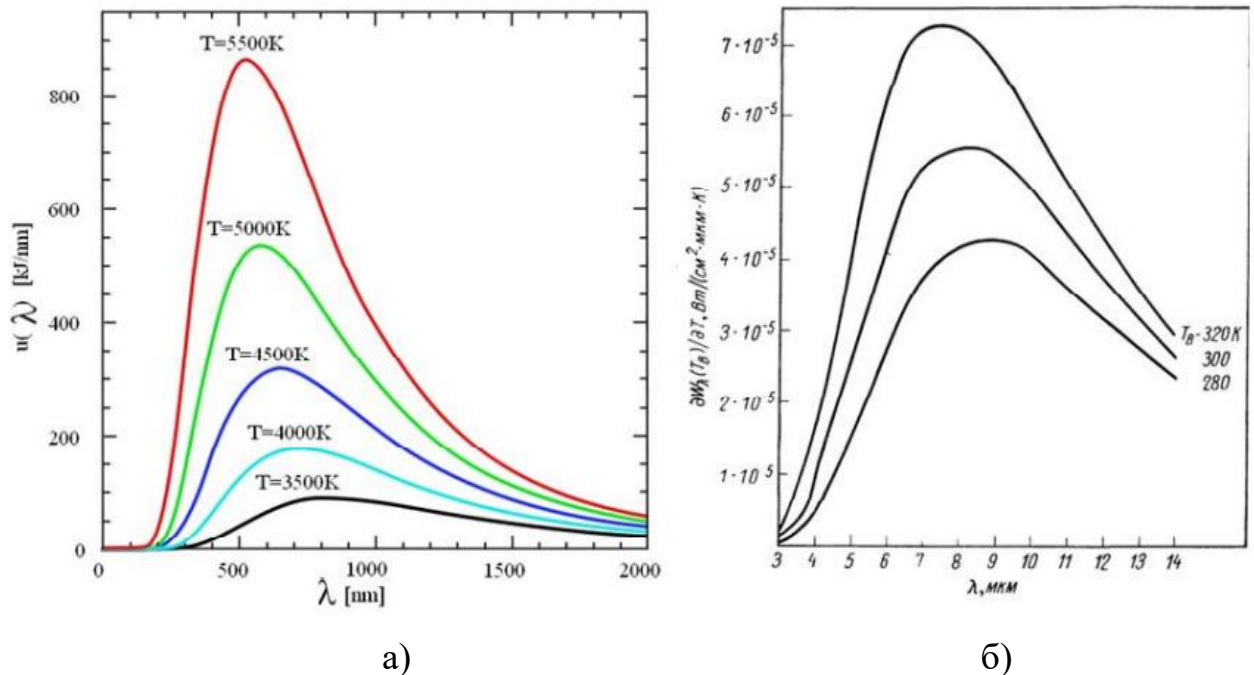


Рисунок 1.1 – Спектр випромінювання для високотемпературних тіл (а, 3500К-5500К), для низькотемпературних тіл (б, 280К-320К)

З рис. 1.1 видно, що повний потік випромінювання АЧТ швидко зростає із зростанням температури. При цьому максимум СПЕС зі збільшенням температури зсувається у бік коротших хвиль.

Тобто, за законом Кірхгофа функція частоти та температури $f(\nu, T)$ є не що інше, як випускна здатність абсолютно чорного тіла.

У 1860 р. Густав Кірхгоф довів, що відношення випускної здатності та спектрального коефіцієнта поглинання (поглинальних здібностей) тіла не

залежить від його природи, а є для всіх тіл однієї і тієї ж (універсальною) функцією частоти та температури:

$$r/\alpha(\nu, T) = f(\nu, T), \text{ або} \\ (r/\alpha(\nu, T))_1 = (r/\alpha(\nu, T))_2 = (r/\alpha(\nu, T))_n = f(\nu, T). \quad (1.6)$$

У 1879 р. Йозеф Стефан, ґрунтуючись на експериментах, вирішив, що енергетична світність будь-якого тіла пропорційна четвертій ступеня температури. Проте за кілька років Больцман довів, що це твердження справедливе лише для абсолютно чорних тіл.

Знайдена ними залежність отримала назви закону Стефана – Больцмана:

$$R_{um} = \int f(\nu, T) d\nu = \sigma T^4, \quad (1.7)$$

де σ – експериментально знайдена константа; $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К).

З квантової механіки відомо, що теплове випромінювання є потік квантів Бозівського газу – фотонів.

При інтерпретації термограм, одержуваних у ТПС, необхідно враховувати умови спостереження об'єктів та залежності коефіцієнтів власного випромінювання об'єктів та коефіцієнтів відображення від об'єктів власного випромінювання фону. Щоб порівнювати інтегральні величини випромінювання чорного тіла та селективного випромінювача, введено поняття радіаційної температури – температури чорного тіла, що має таку ж сумарну (по всьому спектру) енергетичну світність, що й цей селективний випромінювач (об'єкт).

1.5 Проходження інфрачервоного випромінювання крізь атмосферу

При проектуванні ІЧ системи спостереження розробники вирішують завдання створення апаратури з урахуванням проходження теплового випромінювання в поглинаючих середовищах [1-3].

У більшості випадків випромінення від цілі проходить крізь шар атмосфери Землі і послаблюється, або зовсім затухає за рахунок розсіяння і поглинання молекулами водяної пари, вуглекислого газу та озону. Спектральне пропускання випромінення атмосферою наведено на рис.1.2 [1].

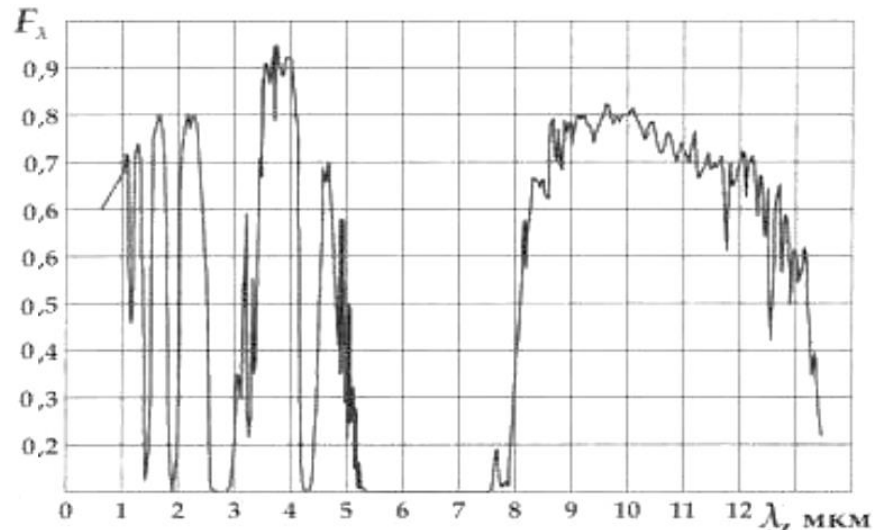


Рисунок 1.2 – Графіки пропускання атмосфери в інфрачервоній області

Шар озону на висоті ≈ 80 км затримує надкороткохвильове ультрафіолетове випромінювання. Можна виділити поглинання в таких діапазонах:

- а – звичайний ультрафіолет (0,2...0,4 мкм) і видимий діапазон – 0,45...0,8 мкм;
- б – ближній інфрачервоний діапазон (0,76...1,5 мкм) і короткохвильовий (1,5...2,8 мкм);
- в – середній інфрачервоний діапазон (2,8...5,6 мкм);
- г – довгохвильовий інфрачервоний діапазон (5,6...29 мкм);
- д – дальній інфрачервоний діапазон (30...300 мкм).

В атмосферному середовищі є вікна прозорості, що стандартизовані для міжнародної фотометричної системи через $\lambda \pm \Delta\lambda$ [1-3]:

- у видимому та на початку ближнього інфрачервоного діапазонів: В, V, R, J – до 1,2 мкм;
- Н-діапазон – $1,6 \pm 0,1$ мкм;
- К-діапазон – $2,2 \pm 0,3$ мкм;

- L-діапазон – $3,6 \pm 0,45$ мкм;
- M-діапазон – $4,6 \pm 0,5$ мкм;
- N-діапазон – $10,0 \pm 2,0$ мкм;
- Q-діапазон – $20,0 \pm 0,4$ мкм.

Між смугами прозорості присутні смуги повного поглинання ІЧ-випромінення атмосферою: парою води H_2O (2,7 мкм; 3,2 мкм; 6,3 мкм), вуглецевим газом CO_2 (2,7 мкм; 4,3 мкм; 15 мкм), закисом азоту N_2O (4,7 мкм; 7,8 мкм), окисом вуглецю CO (4,8 мкм) і метаном CH_4 (3,2 мкм; 7,8 мкм) [1-3]. Найсильнішим фактором поглинання, не враховуючи ослаблення поглинання в щільних дисперсних середовищах, є молекулярне ослаблення наступними компонентами: пара води, вуглецевий газ і озон O_3 . У нижніх шарах атмосфери можна знехтувати ослабленням закисом азоту і окисом вуглецю.

Смуги поглинання водяної пари з центром 6,3 мкм і вуглекислого газу з центрами 2,7 мкм і 15 мкм обмежують пропускання випромінення атмосферним шаром в діапазоні хвиль довжиною 2...20 мкм, визначаючи розташування двох вікон прозорості: 3,5...5 мкм і 8...14 мкм.

Ефективність ТпВ систем в значній мірі залежить від умов теплообміну між підстильною поверхнею і повітрям. В рівноважних умовах теплообміну ТпВ спостерігають тільки цілі за температурним контрастом без прив'язування до навколишнього середовища, оскільки відмінності в температурі окремих ділянок фону практично не помітні. Крім цього, значне поглинання сигналів власного теплового випромінення цілей і фону спостерігається за умов густого туману або дрібного дощу, розмірів водних крапель в яких порівнянні із середньою довжиною хвилі в діапазоні чутливості ТпВ. У той же час, затухання в ТГц діапазоні у вказаних середовищах надто менше.

Інформація про ступінь поглинання (або пропущення) випромінення атмосферою та її складовими на різних довжинах хвиль надана в графіку на рис. 1.3 [1].

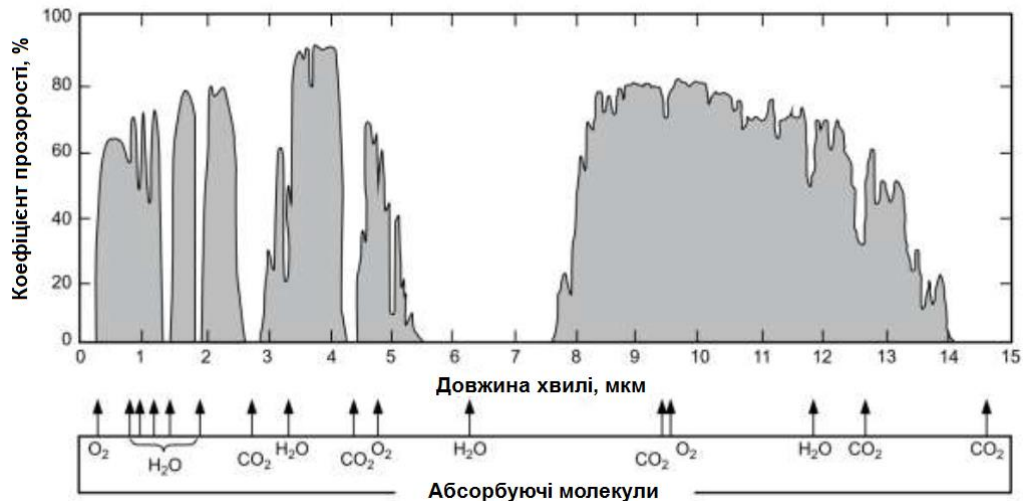


Рисунок 1.3 – Спектр пропускання атмосфери Землі

1.6 Вплив атмосферних утворень і атмосферних газів

Атмосферний пил, дим, пилок рослин, частинки солей, бактерій, краплі води, мікроби, кристали льоду та інші частки мають значну роль при розсіюванні випромінення, а також є центрами конденсації водяних парів при утворенні туманів і хмар. Розподіл частинок по висоті пов'язаний зі швидкістю їх спадіння, яка пропорційна квадрату їхнього розміру і може бути розрахована за формулою Стокса [1-3]:

$$V = 1.26 \cdot 10^6 \cdot r,$$

де r – радіус часток, см.

Розподіл частинок по висоті можна розрахувати за наступною формулою:

$$n_H = n_0 \cdot e^{(-V \cdot H / K)},$$

де K – коефіцієнт турбулізованості середовища ($V/K = 400 \div 750$).

В чистому повітрі міститься до $0,00025 \text{ г/м}^3$ пилу, після дощу концентрація зменшується приблизно в 3...5 разів.

Кількість води в краплях дощу істотно менше, ніж в водяних парах в тумані при тому ж самому об'ємі атмосфери. Отже, в дощ поглинання випромінення збільшується мало, але зростає розсіяння (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Кількість і розмір часток, які містяться в повітрі

Домішка	Розмір частинок, мкм	Число частинок, см ³	Вміст води, г/м ³
Іони	10 ⁻³	10	
Пил	1÷100	1÷10	
Крапельки димки	10 ⁻¹ ÷1	10	
Слабкий туман	5	100	6·10 ⁻²
Щільний туман	2050	200	5·10 ⁻¹
Паморозь	100	-	9·10 ⁻³
Слабкий дощ	500	-	0,28
Злива (100 мм / год)	2000	-	5,4

У літературних джерелах є значні і в той же час не повні і не завжди узгоджені дані відносно впливу гідрометеорів на випромінення [1-3]. Маючи на увазі задачу грубого порівняльного оцінювання затухання хвиль міліметрового і інфрпачервоного діапазонів, звернемо увагу на графік затухання випромінення в тумані (метеорологічна відстань видимості 100 м) і у дощі інтенсивності від малої до середньої (рис.1.4).

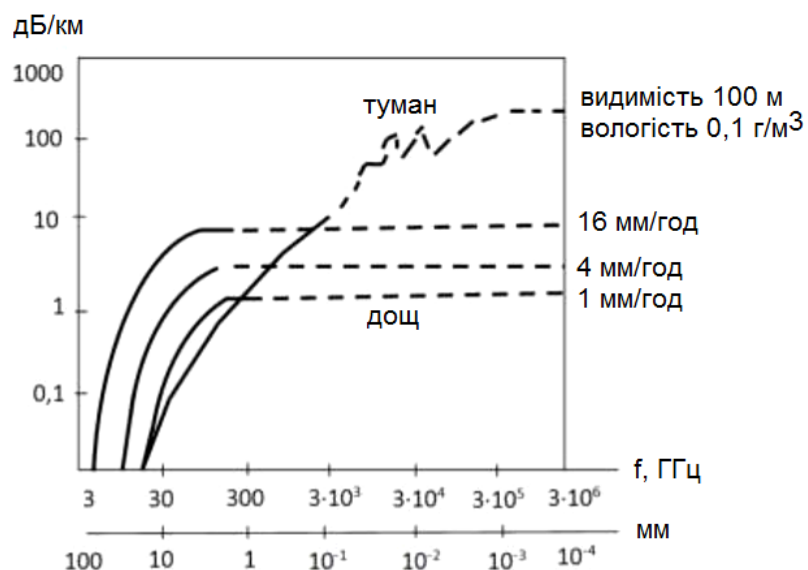


Рисунок 1.4 – Графік ослаблення випромінення в тумані і дощі

Як видно з графіка рис. 1.4, затухання інфрачервоного випромінення в такому тумані складає більш ніж 100 дБ/км, що робить канал непридатним для роботи.

При $\lambda > 1$ мм затухання $\gamma < 1$ дБ / км, що свідчить про прийнятні умови поширення хвиль. За більш суворими оцінками $\gamma < 1$ дБ / км при $\lambda > 1$ мм і видимості не менше 600 м або при $\lambda \sim 3$ мм і видимості не менше 300 м.

На рис. 1.5, представлені залежності затухання від метеорологічної дальності видимості для 4-х довжин хвиль [2].

Порівняння інфрачервоного і радіодіапазонів веде до висновку, що придатність до роботи у відносно густому тумані може бути забезпечена у діапазоні $\lambda \geq 3$ мм. За величиною ослаблення випромінення в дощі інфрачервоний і радіоканал є порівняними і зберігатимуть працездатність (ослаблення не більше 1 дБ/км) у відносно слабкий дощ з інтенсивністю біля 1 мм/год на трасі протяжністю біля 1 км (поширення в одному напрямку), або у більш сильний дощ на частині траси.

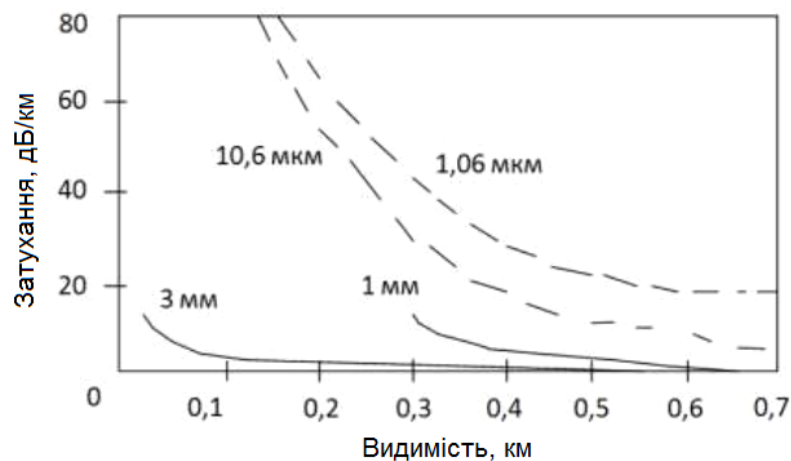


Рисунок 1.5 – Залежність ослаблення випромінення від метеорологічної дальності видимості

Затухання випромінення в хмарах залежить від їх товщини, водності, концентрації і розмірів крапель, і на довжинах хвиль 0,48...10,6 мкм лежить в межах 50...650 дБ/км, мало змінюючись з довжиною хвилі. Дані по мм діапазоні обмежені: в [2] наводяться затухання для $\lambda = 9$ мм в межах

0,647...1,25 дБ·г/(км·м³). Там же вказується про дуже мале затування від крижаних хмар. Зазначимо, що істотну роль при поширенні крізь хмари може мати зміна затування при зміні положення цілі по причині просторової неоднорідності параметрів хмар.

Затування НВЧ коливань в сухому снігові значно менше, ніж у дощі, а в мокрому – приблизно в 2,5 рази більше (за однакової інтенсивності). Про вплив снігопаду на затування в інфрачервоному діапазоні є мало даних. Снігопад середньої інтенсивності викликає затування біля 3,4 дБ/км, що, напевно, більше затування міліметрових хвиль в сухому снігові і менше у випадку мокрого снігу.

Сухий град не ослабляє випромінення НВЧ, але покриті плівкою води частки тануть і можуть створювати значне затування.

Отже, найбільш несприятливими у ТГц діапазоні є фактори мокрого снігу або таючого граду.

Затування оптичних хвиль у димці при метеорологічній дальності 1...2 км складає 3,4 дБ / км для $\lambda=10,6$ мкм і 10 дБ / км для $\lambda=1$ мкм. Дані по затуванню в димці і пилу недостатні. На думку зарубіжних науковців, саме в таких умовах (разом з туманом) хвилі мм діапазону матимуть перевагу у порівнянні з оптичним каналом (включаючи інфрачервону область).

В цілому, наведена інформація свідчить про доцільність використання випромінювання в області $\lambda \geq 3$ мм для вирішення задач виявлення і радіоспостереження в умовах туману, диму і пилу. При обмеженні на розмір приймальної антени і вимогах максимального розрізнення робочий діапазон визначається вікном прозорості 2,6...4,2 мм з загасанням 0,3 дБ/км у чистій атмосфері і 1 дБ/км при метеорологічній дальності 100...300 м при $\lambda \sim 3,2$ мм. Відповідна середня робоча частота системи становитиме 94 ГГц.

1.7 Концепція комплексування тепловізійних каналів

Концепція побудови комбінованих та комплектованих оптико-електронних систем спостереження на складному фоні на користь військової

техніки вперше була розроблена в Державному оптичному інституті ім. С.І. Вавілова в середині 80-х років.

На перших етапах досліджень комплексування (об'єднання каналів видимого та теплового діапазонів із спостереженням через один загальний об'єктив) та комбінування (об'єднання каналів на одній платформі, але з окремими об'єктивами) показали суттєву якісну та кількісну вигоду у вирішенні завдань виявлення, розрізнення, розпізнавання, стеження та цілевказівки при роботі з об'єктами.

Комплексування каналів лише оптичного діапазону спектру електромагнітних коливань (ЕМК) забезпечує підвищення дальності виявлення та розпізнавання об'єктів у 1,5...3 рази, формуючи в просторі предметів контрасти об'єктів відносно фону за рахунок перетворення сонячної та зоряної радіації у видимому діапазоні 0,4...1,1 мкм та переважно за рахунок власного випромінювання об'єктів у тепловому діапазоні 3,2...14 мкм.

Однак уже в ті роки висловлювалися пропозиції щодо необхідності подальшого розширення діапазонів спостереження до ультрафіолетового (УФ) (0,17...0,4 мкм) і були виконані попередні дослідження з подальшого розширення теплового діапазону до 30-300 мкм (ТГц) спектру ЕМК).

При цьому аналізі необхідно враховувати три ефекти. По-перше, за певних довжин хвиль різні молекули поглинають випромінювання, створюючи атмосферні вікна пропускання між цими смугами поглинання. Такі вікна з'являються навколо частот 35 ГГц, 94 ГГц, 140 ГГц та 220 ГГц.

По-друге, маленькі частинки та аерозолі можуть розсіювати радіацію. Величина розсіювання залежить від довжини хвилі, від розміру, форми та коефіцієнта заломлення частинок. Це пов'язано з діапазоном хвиль, в якому хмари, туман та дим викликають невелике ослаблення в порівнянні з їх впливом у видимому та інфрачервоному діапазоні.

По-третє, коли розмір частки зіставимий або більше, ніж довжина хвилі, проходження випромінювання утруднено через геометричний поперечний переріз частинок, типу дощу.

1.8 Висновки по розділу 1

Інфрачервоний канал будемо розглядати як один з каналів у комплексованій системі виявлення, розпізнавання, ідентифікації і пеленгації БПЛА. В комплексованій системі використовують радіолокаційні [11], радіочастотні [12], акустичні [13-15] і оптико-електронні [16-18] методи.

На кафедрі Медіаінженерії і інформаційних радіоелектронних систем ХНУРЕ виконуються дослідження в рамках НДР №327 «Розроблення системи комплексної обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначення їх координат та параметрів руху». Тематика даної атестаційної роботи відповідає і доповнює дослідження в рамках НДР №327.

Для задачі виявлення, розпізнавання, пеленгації і супроводу малих дронів, які є рухомими об'єктами, в інфрачервоному діапазоні найвигідніше використовувати матричні тепловізори без оптико-механічного сканування (FLIR – Forward Looking Infrared – «ті, що дивляться вперед»). Це дасть можливість отримати необхідну просторову роздільну здатність (від стандартної чіткості SD до FullHD і вище), достатню частоту кадрів (25 к/с і вище). В той же час, тепловізори мають набагато менше максимальне поле зору, ніж відеокамери оптичного видимого діапазону хвиль. Це потребує застосування додаткової механічної системи для позиціонування тепловізора при скануванні поля огляду і супроводу БПЛА в разі його виявлення.

При розрахунках необхідної чутливості тепловізора слід враховувати не тільки енергетичні і спектральні характеристики випромінення дрону, але й характеристики затухання хвиль інфрачервоного діапазону в атмосфері з урахуванням метеоумов поширення хвиль, максимальної дальності виявлення дрону і його кута місця.

2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ В ТЕПЛОВОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

2.1 Розрахунок чутливості і дальності дії тепловізійного каналу

Розрахунок чутливості ТпВ каналу виконується за формулою [6]:

$$\Delta T = \frac{SNR \cdot \Phi_{ne1} \sqrt{A_{np} \Delta f_n}}{4,625 \cdot 10^{-12} T^3 d_{ef}^2 \delta^2 \ln \Delta \lambda_{ef} \sqrt{n}}, \quad (2.1)$$

де SNR – відношення сигнал/шум;

$\Phi_{ne1} = 1/D$ – спектральний поріг чутливості приймача випромінювання, $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$;

D – питома виявна здатність приймача випромінювання в максимумі його спектральної характеристики, визначена на електричній частоті, при якій спектр напруги шуму приведений до одиниці, $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$;

A_{np} – площа приймача випромінювання, у якого розміри по горизонталі та вертикалі рівні, см^2 ;

Δf_n – еквівалентна шумова смуга підсилювального тракту, Гц;

T – температура фону, К;

d_{ef} – ефективний діаметр вхідної зіниці оптичної системи, см;

δ – елементарний кут поля зору ТпВ, рад;

n – кількість пікселів, які працюють у режимі накопичення;

$\Delta \lambda_{ef}$ – ефективна відносна спектральна смуга пропускання системи.

$$\ln \Delta \lambda_{ef} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) S_o(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda / \lambda. \quad (2.2)$$

де $\phi(\lambda)$ – відносна спектральна характеристика потоку випромінювання об'єкта (наприклад, БПЛА);

$S_o(\lambda)$ – відносна спектральна характеристика чутливості приймача випромінювання.

Для вимірювання ΔT у лабораторних умовах використовується чотириштрихова міра, що утворює квадрат. Відношення довжини штриха до його ширини (формат) – 7 : 1. Вводиться також деякий показник $k_{скл}$ – рівень складності розв'язуваної задачі.

Якщо мета відмінна за форматом від міри (7 : 1), то для корекції по формату вводиться множник $\sqrt{\varepsilon/7}$, де ε – відношення довжини до ширини окремо дозволених штрихів еквівалентної міри, яка замінює ціль у межах прямокутного контуру. Для вирішення задачі виявлення показник $k_{скл}$ приймається рівним 1, при розпізнаванні $k_{скл}=4$.

Різниця температур ΔT між ціллю та фоном (уявна різниця температур) буде менше через ослаблення випромінювання в атмосфері $\Delta T \tau_{атм}$.

Реєстрована ТпВ різниця температур може бути апроксимована у вигляді

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-\beta_{сист} \nu}, \quad (2.3)$$

де $\beta_{сист}$ – коефіцієнт приладового ослаблення;

ν – просторова частота, 1/мрад;

ΔT_0 – точка перетину кривої спаду опромінення з віссю ν (характеризує чутливість приладу загалом). При відношенні сигнал/шум $SNR = 1$ (50% ймовірність розв'язання задачі) дальність дії системи:

$$R = \frac{\ln \frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}, \quad (2.4)$$

де ΔT – різниця температур цілі і фону;

ΔT_0 – максимальна чутливість тепловізора;

p – співвідношення сторін (формат) зображення цілі;

d – розмір цілі, м;

$\beta_{атм}$ – коефіцієнт ослаблення атмосферою;

$k_{скл}$ – коефіцієнт складності розв'язуваної задачі (в задачі виявлення показник $k_{скл}=1$, при розпізнаванні $k_{скл}=4$);

$\beta_{сист}$ – коефіцієнт приладового ослаблення.

Таким чином, для розрахунку дальності дії використовуються такі характеристики:

- характеристики тепловізора;
- показник рівня складності задачі з числом пар ліній, що укладаються на мінімальний розмір об'єкта;
- параметри цілей;
- атмосферні умови.

Уточнена дальність дії з урахуванням ймовірності виявлення

$$R = \frac{\ln\left(\frac{1}{SNR} \frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}\right)}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}. \quad (2.5)$$

Якщо виразити відношення сигнал-шум в дБ

$$SNR = 10^{SNR_{дБ}/10}, \quad (2.6)$$

то запишемо вираз (2.5) у вигляді:

$$R = \frac{\ln\left(\frac{1}{10^{SNR_{дБ}/10}} \frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}\right)}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}} = \frac{\ln\left(10^{-SNR_{дБ}/10}\right) + \ln\left(\frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}\right)}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}. \quad (2.7)$$

Виконуючи нескладні перетворення, запишемо (2.7) у вигляді

$$R = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}\right) - \frac{SNR_{dB}}{10} \ln(10)}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}\right) - 0,23 \cdot SNR_{dB}}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}. \quad (2.8)$$

Виносячи з-під логарифму множник $\sqrt{1/7}$, отримаємо

$$R = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T \sqrt{p/7}}{\Delta T_0}\right) - \frac{SNR_{dB}}{10} \ln(10)}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}} = \frac{\ln\left(\frac{\Delta T \sqrt{p}}{\Delta T_0}\right) - 0,23 \cdot SNR_{dB} - 1}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}. \quad (2.9)$$

У разі квадратних об'єктів ($p = 1$), якими можна вважати зображення малих дронів,

$$R = \frac{\ln(\Delta T / \Delta T_0) - 0,23 \cdot SNR_{dB} - 1}{\beta_{атм} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}. \quad (2.10)$$

Зазвичай $\beta_{атм}$ визначають по графікам в дБ/км в залежності від метеорологічної дальності видимості. Тобто

$$\beta_{атм} = 10^3 \cdot 10^{\beta_{атм dB/km}/10} = 10^{(3+\beta_{атм dB/km}/10)}, \quad (2.11)$$

а значить

$$R = \frac{\ln(\Delta T / \Delta T_0) - 0,23 \cdot SNR_{dB} - 1}{10^{(3+\beta_{атм dB/km}/10)} + \frac{k_{скл}}{d} \beta_{сист}}. \quad (2.12)$$

Відповідно до виведеного співвідношення (2.9) побудовано функцію виявлення ТпВ для знаходження дальності по тепловому контрасту квадратних об'єктів (рис.2.2).

Розрахунки функції виявлення проведені для $\beta_{атм} = 3,4$ дБ/км (що відповідає метеорологічній дальності видимості більше 1 км згідно графіку на рис.1.5 для довжини хвилі $\lambda = 10$ мкм). Різм дрону в розрахунках прийнято $d = 0,33$ м, що відповідає моделі (DJI Phantom 3, рис.2.1).



Рисунок 2.1 – Розміри дрону DJI Phantom 3

Розрахунки функції виявлення виконані для трьох відношень сигнал-шум: $SNR = 3, 10, 20$ дБ (рис. 2.2). Чутливість тепловізійного приймача прийнята рівною $\Delta T_0 = 50$ мК, коефіцієнт системного ослаблення $\beta_{сист} = 1,2$, це досить поширені значення для сучасних моделей.

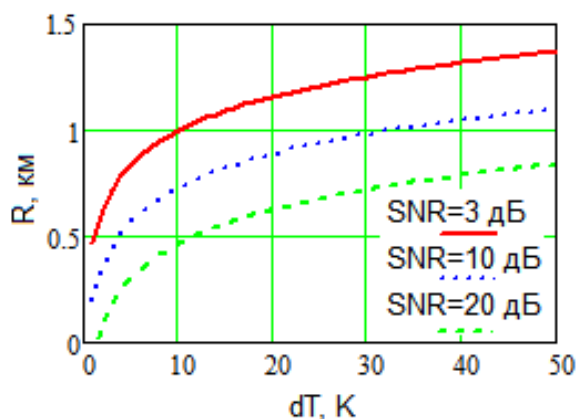


Рисунок 2.2 – Функція виявлення тепловізора для знаходження дальності R по тепловому контрасту ΔT квадратних об'єктів при різних SNR

У разі, коли розміри дрона відрізняються від $d = 0,33$ м, хід функції виявлення буде іншим. На рис.2.3 показані функції виявлення при $SNR=10$ дБ для трьох значень розмірів: $d=0,16$ м; $0,33$ м; 1 м.

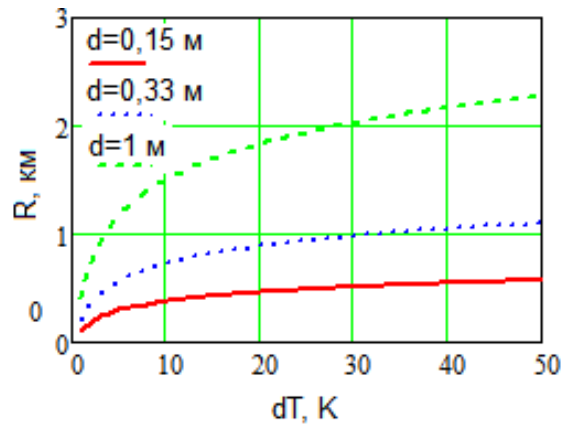


Рисунок 2.3 – Функція виявлення тепловізора для знаходження дальності R по тепловому контрасту ΔT квадратних об'єктів розміром d

Як впливає з рис.2.3, такий фактор як розмір цілі є дуже d вирішальним для тепловізійного виявлення БПЛА. Для виявлення БПЛА розміром $d=0,33$ м на відстані, що перебільшує метеорологічну дальність видимості 1 км, потрібен тепловий контраст об'єкта з фоном $\Delta T=30$ К. В той же час, для виявлення БПЛА розміром $d=1$ м на відстані більше 1 км достатньо буде температурного контрасту $\Delta T=3$ К.

Важливим фактором також є відношення сигнал-шум, при якому зможе працювати система для виявлення, розпізнавання і ідентифікації об'єкта. З рис.2.2 впливає, що в тому випадку, якщо система зможе працювати при $SNR=20$ дБ, то для тепловізійного виявлення БПЛА розміром $d=0,33$ м на відстані, що перебільшує метеорологічну дальність видимості 1 км, потрібен тепловий контраст об'єкта з фоном $\Delta T \approx 100$ К. В той же час, якщо система буде здатна виявляти БПЛА з відношенням сигнал-шум $SNR=10$ дБ при тієї ж самій дальності, буде достатньо теплового контрасту $\Delta T=30$ К, а для $SNR=3$ дБ – $\Delta T=10$ К.

Дуже важливо розрізняти задачі виявлення, розпізнавання і ідентифікації БПЛА. Виявлення – це вирішення задачі знаходження в кадрі об'єкта з тепловим контрастом, який можна віднести до БПЛА. Розпізнавання – це класифікація БПЛА по його типу (квідрокоптер,

гексакоптер, моноплан та ін.). Ідентифікація – це визначення конкретної моделі виявленого і розпізнаного БПЛА.

Вказані випадки відрізняються коефіцієнтом складності вирішуваної задачі, який входить до виразу (2.12). На рис. 2.4 показані функції виявлення для виявлення ($k_{скл}=1$), розпізнавання ($k_{скл}=4$) та ідентифікації ($k_{скл}=16$) БПЛА розміром $d=0,33$ м при $SNR=10$ дБ.

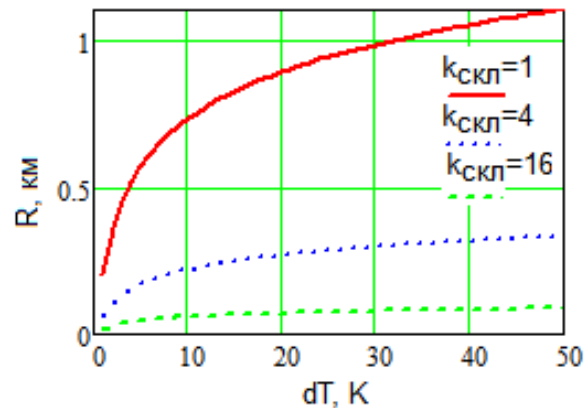


Рисунок 2.4 – Функції виявлення ($k_{скл}=1$), розпізнавання ($k_{скл}=4$) та ідентифікації ($k_{скл}=16$) тепловізора для знаходження дальності R по тепловому контрасту ΔT

З графіків на рис.2.4 слідує, що задача ідентифікації є набагато складнішою за задачі виявлення і розпізнавання, і вимагає великого теплового контрасту і розміру об'єкта. Тому її вирішення треба ставити в найостаннішу чергу. Для задач безпеки перш за все важливі задачі виявлення та ідентифікації БПЛА, які можуть бути вирішені при набагато менших теплових контрастах, відношеннях сигнал-шум, метеорологічних видимостях та на більших відстанях.

2.2 Розрахунок роздільної здатності тепловізійного каналу

Для надійного вирішення задач виявлення, розпізнавання та ідентифікації крім чутливості тепловізора потрібно враховувати роздільну

здатність системи, оскільки розмір зображення об'єкта на матричному перетворювачі повинен займати відповідну кількість пікселів.

З практики роботи систем відеоспостереження відомо, що для виявлення малорозмірних об'єктів на дальностях до 5 км треба застосовувати об'єктиви з фокусною відстанню більше 200 мм [16].

Для визначення максимальної відстані виявлення малорозмірних дронів за допомогою тепловізора можна використати критерій Джонсона. Цей критерій показує, на якій дальності мінімальний критичний розмір об'єкту в площині матричного перетворювача ТпВ дорівнюватиме потрібній кількості пікселів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Залежність критичного розміру зображення об'єктів від складності вирішуваної задачі [19]

Вирішувана задача	<i>N</i>	Умови спостереження
Виділення	0,75	Фон зі слабкою неоднорідністю (снігове поле, будь фон під час дощу)
	3	Фон з сильною неоднорідністю (місто, гори)
Класифікація	1-2	Сцена, що містить сильно відмінні класи об'єктів (Людина, автомобіль)
	4-5	Сцена, яка містить близькі класи об'єктів (легковий або вантажний автомобіль, автобус та ін.)
Ідентифікація	6	Сцена, що містить відмінні типи об'єктів (Автомобіль седан, автомобіль хетчбек)
	9	Сцена, що містить схожі типи об'єктів (різні марки автомобілів)

Відносно типових задач спостереження людини рекомендуються такі значення критерію Джонсона (кількості пікселів зображення на найменший розмір об'єкта [19]) виявлення $N = 1...2$, розпізнавання $N = 4...6$, ідентифікація $N = 8...12$.

Аналогічними міркуваннями будемо користуватися і при виявленні дронів, беручи до уваги пропорції їх вертикального і горизонтального

розміру. Вважатимемо, що пропорції зображення малого дрону 1:1. Тоді відповідні розміри зображення дрону становитимуть:

- для задачі виявлення: 2x2 пікселя;
- для задачі розпізнавання: 8x8 пікселів;
- для задачі ідентифікації: 16x16 пікселів.

Схема перетворення зображення об'єкту в тепловізійному каналі з матричним перетворювачем показана на рис. 2.5.

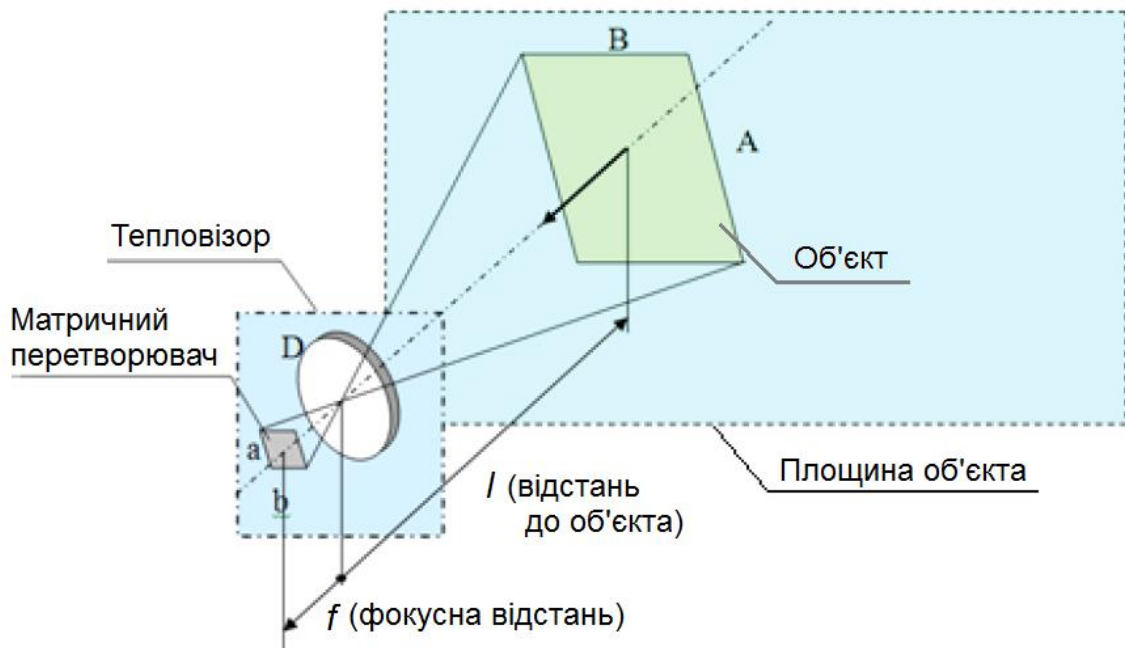


Рисунок 2.5 – Схема перетворення зображення об'єкту в тепловізійному каналі з матричним перетворювачем

Площу об'єкту в межах кута поля зору тепловізора у площині теплочутливого матричного перетворювача визначимо за виразом

$$S_{ab} = \frac{S_{AB} \cdot f^2}{l}, \quad (2.13)$$

де f – фокусна відстань об'єктиву,

l – відстань спостереження об'єкту,

S_{AB} – площа проекції об'єкту спостереження на матрицю.

Кількість елементів матричного тепловізійного перетворювача, що приймають і перетворюють теплове випромінювання від об'єкту (дрону), визначимо зі співвідношення

$$N_{ел} = \frac{S_{об}}{S_{ел}}, \quad (2.14)$$

де $S_{об}$ – розмір об'єкту (дрону) на чутливій площині матричного перетворювача,

$S_{ел}$ – розмір чутливого елемента матричного ТпВ перетворювача.

Значення кількості пікселів $N_{ел}$, яку займає зображення дрону на матриці, обчислені за формулами (2.13–2.14) для малогабаритних дронів площею 0,1, 0,25 і 0,5 м², показані на графіках рис. 2.6 – рис. 2.9.

Там же горизонтальними пунктирними лініями показані пороги:

- виявлення: 2x2=4 пікселя;
- розпізнавання: 8x8=64 пікселя;
- ідентифікації: 16x16=256 пікселів.

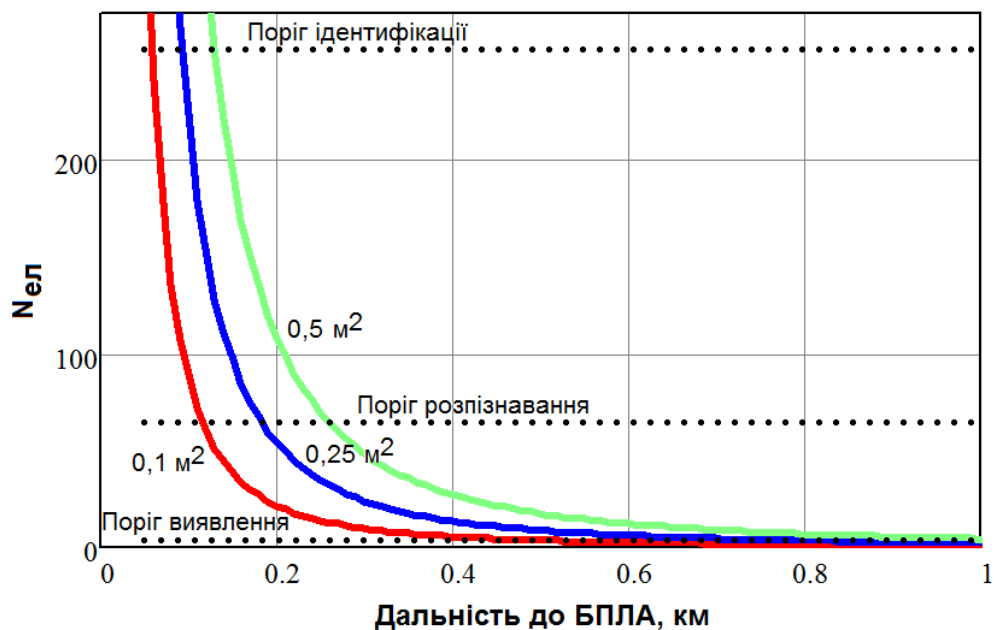


Рисунок 2.6 – Кількість опромінених пікселів в площині матриці в залежності від відстані для різної площі об'єкта при фокусній відстані 50 мм

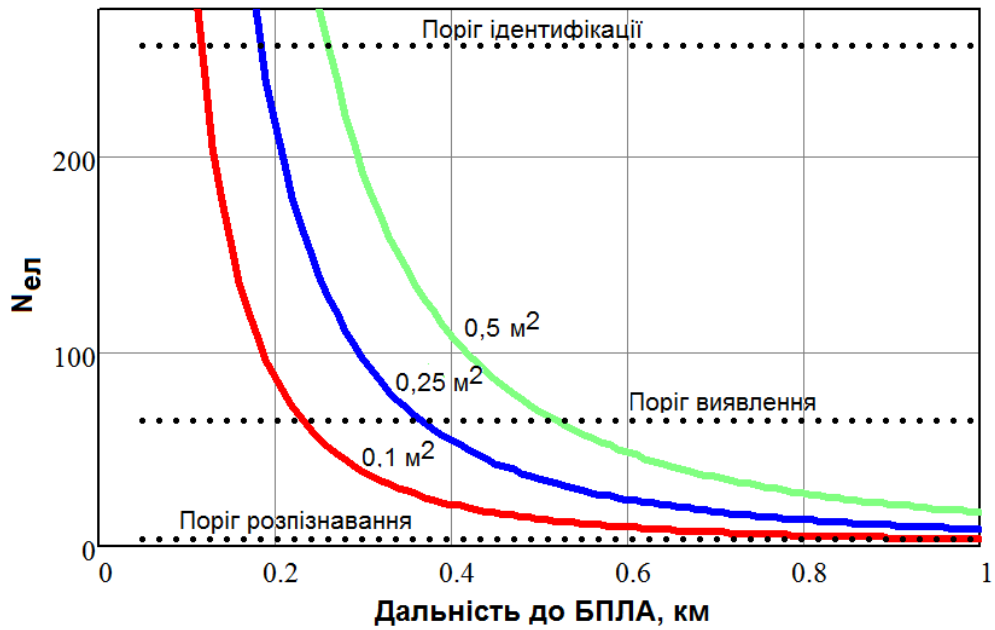


Рисунок 2.7 – Кількість опромінених пікселів в площині матриці в залежності від відстані для різної площі об'єкта при фокусній відстані 100 мм

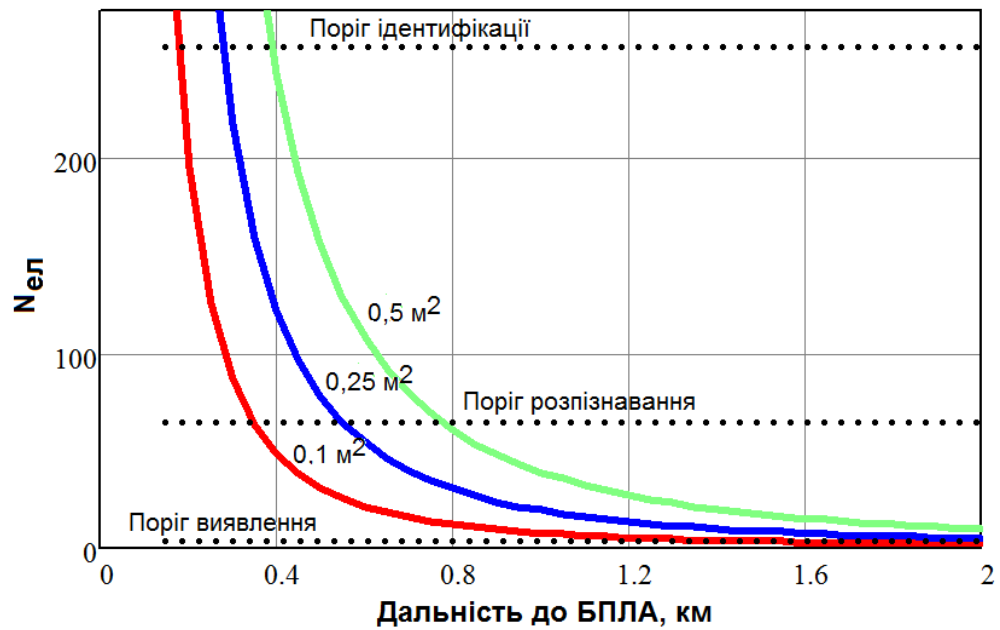


Рисунок 2.8 – Кількість опромінених пікселів в площині матриці в залежності від відстані для різної площі об'єкта при фокусній відстані 150 мм

Максимальну дальність виявлення, розпізнавання і ідентифікації малих БПЛА з врахуванням кількості елементів його зображення на матричному перетворювачі можна розрахувати за формулою:

$$l = f \sqrt{\frac{S_{AB}}{S_{ел} N}}. \quad (2.15)$$

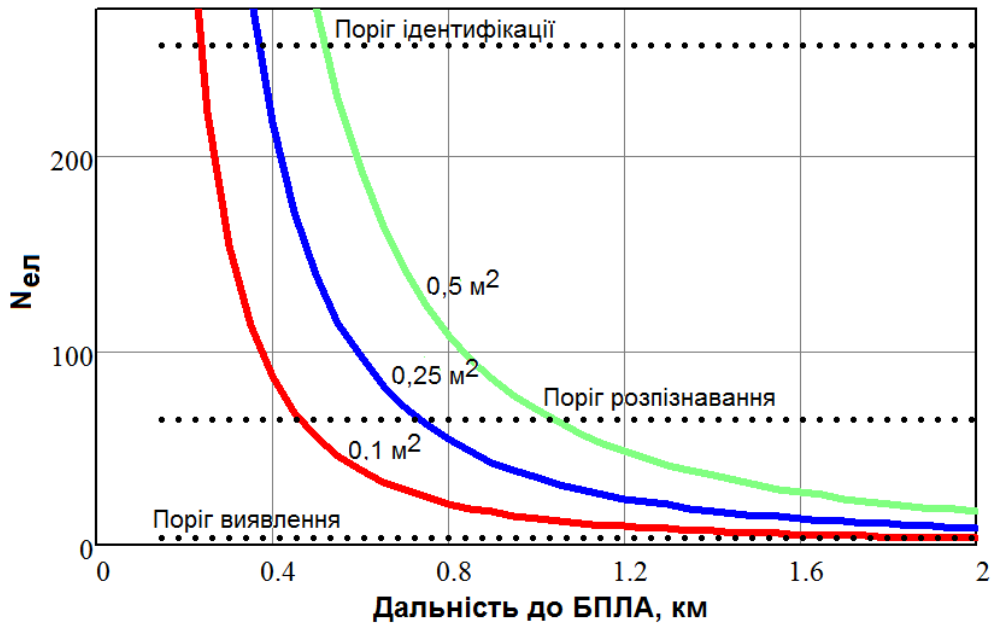


Рисунок 2.9 – Кількість опромінених пікселів в площині матриці в залежності від відстані для різної площі об'єкта при фокусній відстані 200 мм

На рис. 2.10 – рис. 2.12 наведені графіки залежності максимальних дальностей виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону в залежності від фокусної відстані оптичної системи ТпВ для різної площі об'єкта.

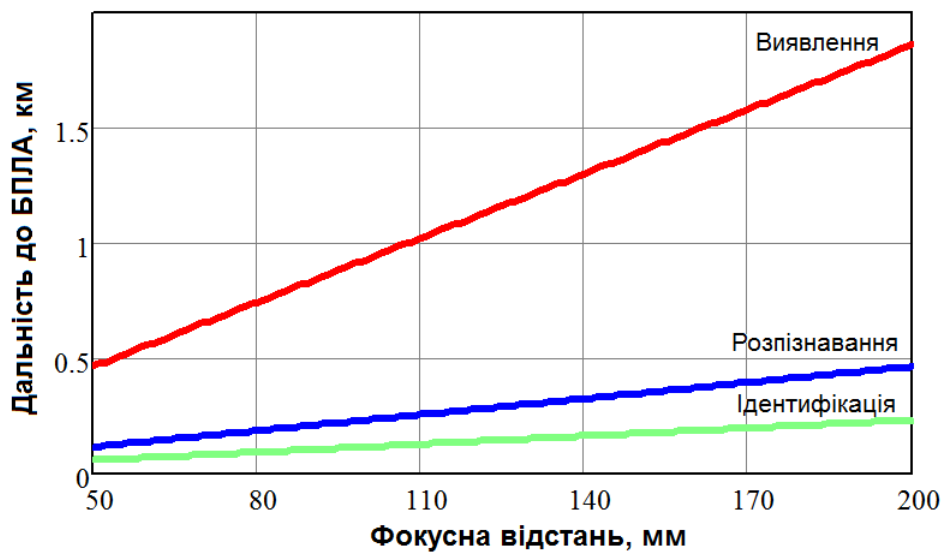


Рисунок 2.10 – Максимальні дальності виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону в залежності від фокусної відстані для площі об'єкта 0,1 м²

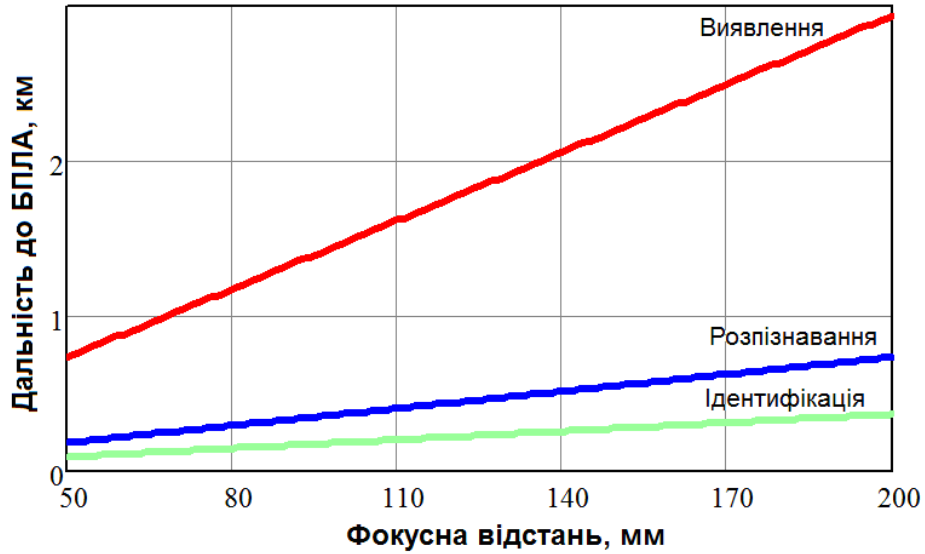


Рисунок 2.11 – Максимальні дальності виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону в залежності від фокусної відстані оптичної системи тепловізора для площі об'єкту 0,25 м²

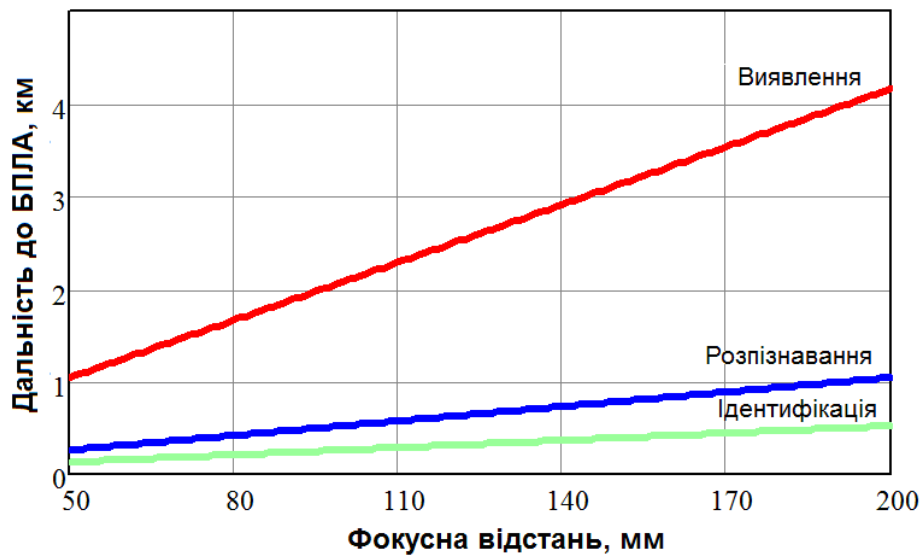


Рисунок 2.12 – Максимальні дальності виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону в залежності від фокусної відстані оптичної системи тепловізора для площі об'єкту 0,5 м²

З отриманих графіків видно, що для фокусних відстаней об'єктиву від 50 мм до 200 мм максимальна дальність виявлення малорозмірного дрону DJI Phantom 3 з площею 33 см x 30 см = 0,1 м² сягає від 0,5 км до 1,8 км. Для

задачі розпізнавання – від 120 м до 460 м, ідентифікації – від 60 м до 240 м. Для відповідного діапазону фокусних відстаней при площі дрона 70 см x 70 см = 0,5 м² дальність виявлення складає від 1 км до 4 км. Для задачі розпізнавання – від 260 м до 1 км, ідентифікації – від 130 м до 520 м.

Використані в кваліфікаційній роботі розрахункові вирази дають найменший результат оцінювання максимальної дальності виявлення, розпізнавання чи ідентифікації дрону.

2.3 Висновки по розділу 2

При оцінці чутливості системи виявлено, що розмір цілі є вирішальним для тепловізійного виявлення дрону. Для виявлення БПЛА розміром 0,33 м на відстані, що перебільшує метеорологічну дальність видимості 1 км, потрібен тепловий контраст об'єкта з фоном 30 К. В той же час, для виявлення дронеу розміром 1 м на відстані більше 1 км достатньо буде температурного контрасту 3 К.

Важливим фактором також є відношення сигнал-шум, при якому зможе працювати система. Якщо система зможе працювати при $SNR=20$ дБ, то для виявлення дрону розміром 0,33 м на відстані 1 км потрібен тепловий контраст об'єкта з фоном 100 К. В той же час, якщо система буде здатна виявляти дрон з відношенням сигнал-шум $SNR=10$ дБ буде достатньо теплового контрасту 30 К. Отже, для навчання і тестування нейтронної мережі потрібно мати зображення з різним тепловим контрастом і відношенням сигнал-шум.

Показано, що задача ідентифікації є набагато складнішою за задачі виявлення і розпізнавання, і вимагає великого теплового контрасту і розміру об'єкта. Тому її вирішення треба ставити в найостаннішу чергу. Для задач безпеки перш за все важливі задачі виявлення та ідентифікації БПЛА, які можуть бути вирішені при набагато менших теплових контрастах,

відношеннях сигнал-шум, метеорологічних видимостях та на більших відстанях.

Для збільшення дальності тепловізійного каналу можливо використовувати об'єктиви з фокусною відстанню більше 200 мм. Але це призведе до зменшення поля зору системи і сильно ускладнить процес пошуку дрону.

Застосування матричного перетворювача формату HD або FullHD дозволить збільшити поле зору системи і тим самим зменшити час виявлення.

Отже, можна стверджувати, що в тепловізійній системі виявлення малих дронів найдоцільніше використовувати оптичну систему з широким полем зору $>25^\circ$, короткою фокусною відстанню близько 50 мм і матричний приймач роздільною здатністю 1920 x1024.

Для розпізнавання та ідентифікації малих дронів доцільно застосовувати об'єктиви з фокусною відстанню більше 200 мм. В цьому разі розмір зображення дрону буде займати на матриці велику кількість пікселів.

3 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МАЛИХ ДРОНІВ У ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ YOLOv5

3.1 Постановка задачі

Більшість систем з виявлення об'єктів на зображеннях та відео базується на використанні нейронних мереж. При цьому головною вимогою є робота системи в реальному часі. До нейронних мереж з високою продуктивністю можна віднести сімейство YOLO [20], зокрема YOLOv5. Це сімейство моделей виявлення об'єктів зі складовим масштабуванням. Найчастіше метод YOLOv5 застосовується до зображень і відео видимого діапазону. Зображення об'єктів можуть бути отримані стаціонарними або мобільними відеокамерами, розташованими, наприклад, на дронах [21, 22]. Дослідження [23] описує успішне застосування мереж YOLOv5 при виявленні дронів у відео послідовностях, отриманих зі стаціонарної камери.

Відомі роботи, присвячені виявленню об'єктів по тепловізійному зображенню. Найчастіше виявляють такі об'єкти, як машини, люди [24, 25], тварини або риби [26].

Особливість тепловізійного зображення полягає в його меншій деталізації, ніж у видимому діапазоні. Також на процес виявлення суттєво впливає тепловий контраст об'єкта з фоном, а також характеристики фонових утворень.

В роботі [27] проведено експеримент з візуального виявлення малих дронів різних розмірів за допомогою тепловізора. Отримані в цій роботі максимальні дальності виявлення не співпадають з розрахованими за критерієм Джонсона. Такі оцінки в чистому вигляді дають сильно завищені очікування відносно ефективності тепловізійної системи в реальних умовах.

Для точної оцінки ефективності тепловізійного каналу автоматизованої системи виявлення дронів потрібно врахувати такі фактори, як

характеристики об'єкту спостереження (контраст з фоном, форма, особливості контуру), характеристики фону (яскравість, рівномірність), характеристики автоматизованої системи виявлення (нейтронної мережі).

Задача досліджень в даному розділі – оцінити ефективність виявлення малих дронів в тепловізійному каналі методом YOLOv5 з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

На відміну від видимого діапазону, у відкритому доступі не існує великої кількості зображень дронів в тепловому інфрачервоному ІЧ діапазоні. Для отримання великого ансамблю ІЧ зображень з метою навчання нейронної мережі потрібен сучасний тепловізор з високою роздільною здатністю. Такі тепловізори в наш мають значну вартість і крім того, вкрай потрібні ЗСУ. В наших дослідженнях використано тепловізор-пірометр початкового рівня з невисокою роздільною здатністю. Методика дослідження побудована таким чином, щоби шляхом обробки ІЧ зображень отримати потрібний масив зображень дронів в тепловому діапазоні на різному фоні з різним відношенням сигнал-фон.

Слід зазначити, що дану методику можна точно так же застосувати до зображень дронів і інших об'єктів у видимому оптичному діапазоні. Це розширює і урізноманітнює можливості навчання будь-яких нейронних мереж з розпізнавання об'єктів.

3.2 Архітектура нейронних мереж YOLOv5

Виявлення об'єктів, сценарій використання, для якого розроблено YOLOv5, передбачає створення функцій із вхідних зображень. Потім ці функції передаються через систему прогнозування, щоб намалювати рамки навколо об'єктів і передбачити їх класи (рис.3.1).

Модель YOLO була першим детектором об'єктів, який з'єднав процедуру передбачення обмежувальних рамок із мітками класів у наскрізній диференційованій мережі.

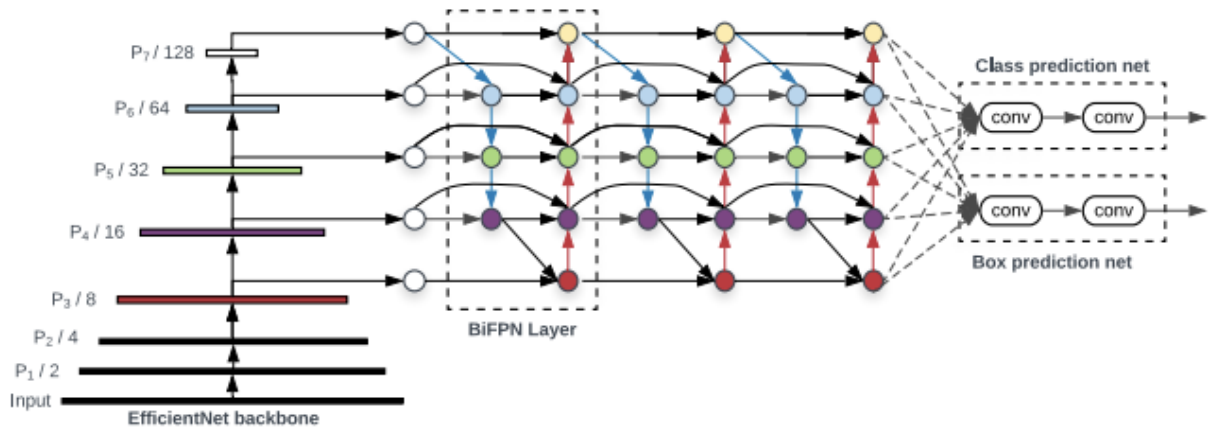


Рисунок 3.1 – Структурна схема детектора об'єктів

Мережа YOLO складається з трьох основних частин (рис.3.2):

- Backbone (основа): згорточна нейронна мережа, яка об'єднує та формує характеристики зображення з різною деталізацією.
- Neck (шия): серія шарів для змішування та комбінування елементів зображення, щоб передати їх у передбачення.
- Head (голова): споживає функції шиї та виконує кроки передбачення області розташування та класу об'єкту.

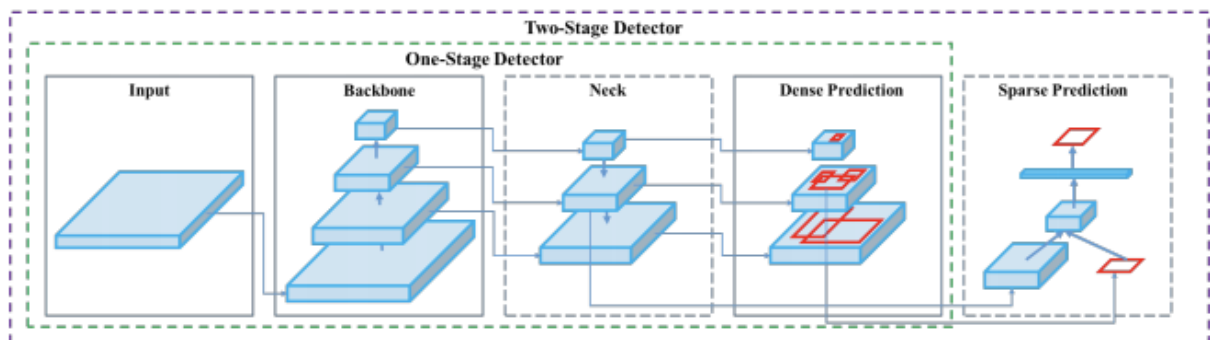


Рисунок 3.2 – Структурна схема детектора YOLOv5

Процедури, які застосовуються для навчання моделі, так само важливі, як і будь-який фактор для кінцевої продуктивності системи виявлення об'єктів, хоча вони часто менше обговорюються. Розглянемо дві основні процедури навчання в YOLOv5:

- донавчання мережі: доповнення даних здійснює перетворення базових навчальних даних, щоб навчити модель більш ширшому діапазону семантичних варіацій, ніж окремий навчальний набір.

- обчислення втрат: YOLO обчислює загальну функцію втрат на основі функцій втрат GIoU, obj і class. Ці функції можна ретельно сконструювати, щоб максимізувати мету середньої середньої точності.

З кожною навчальною партією YOLOv5 передає навчальні дані через завантажувач даних, який доповнює дані онлайн. Завантажувач даних робить три види доповнень:

- масштабування;
- коригування колірному простору;
- мозаїчне нарощування.

Найбільш новим з них є мозаїчне збільшення даних, яке об'єднує чотири зображення в чотири картинки з випадковим співвідношенням сторін. Мозаїчне доповнення особливо корисне для популярного еталонного тесту виявлення об'єктів COCO, допомагаючи моделі навчитися вирішувати добре відому «проблему малих об'єктів», коли малі об'єкти виявляються не так точно, як більші об'єкти.

Варто зазначити, що варто поекспериментувати з власною серією доповнень, щоб максимізувати продуктивність у нашому спеціальному завданні.

3.3 Методика дослідження

Оцінка впливу зазначених факторів на ефективність виявлення малих дронів методом YOLOv5 отримана у ході натурного і модельного експериментів.

1. Для врахування характеристик об'єкту спостереження була отримана певна кількість його тепловізійних зображень з достатньо високим розрізненням в різних ракурсах, в різних режимах польоту. Точно так же

отримано ряд тепловізійних фонових зображень різних об'єктів – будинків, дерев, хмар. Це потрібно для дослідження процесу розпізнавання дронів на різному фоні.

2. Для моделювання знаходження об'єкту на певній відстані пропорційно зменшувався розмір N тестових зображень з врахуванням параметрів тепловізійної системи і фізичного розміру об'єкта спостереження:

$$N = \frac{FW}{La}, \quad (3.1)$$

де L – дальність до об'єкту,

F – фокусна відстань об'єктива,

W – фізичний розмір об'єкта,

N – розмір зображення об'єкта,

a – фізичний розмір елемента тепловізійного сенсора.

3. Для моделювання фону до тепловізійного зображення об'єкту згідно заданої моделі слід додати сигнал фонових утворень з потрібним законом розподілу.

В роботі [28] показано, що бінарний закон досить добре описує розподіл значення яскравості для фону типу хмарного неба. При цьому нормована кореляційна функція може бути апроксимована залежністю виду

$$K_H(\Delta\varphi) = \exp(-k |\Delta\varphi|), \quad (3.2)$$

де $\Delta\varphi$ – кутова відстань,

k – постійний коефіцієнт.

4. В результаті обробки маскою отримуємо потрібну кількість зображень об'єктів (дронів) з різних відстаней і з різними значеннями відношення сигнал/нерівномірність фону (SCR – signal to clutter ratio):

$$SCR = 20 \lg \frac{K_o}{\sigma_\phi}, \quad (3.3)$$

де $K_o = L_o / \bar{L}_\phi$ – контраст яскравості об'єкта L_o з середньою яскравістю фону \bar{L}_ϕ ;

σ_ϕ – середньоквадратичне відхилення нерівномірності фону.

5. Характеристики виявлення малих дронів в тепловому IR діапазоні для різних відношень сигнал-фон проведено методом YOLOv5. Загальна схема отримання ансамблю ІЧ зображень дронів на заданому фоні для навчання нейронної мережі показана на рис. 3.3.

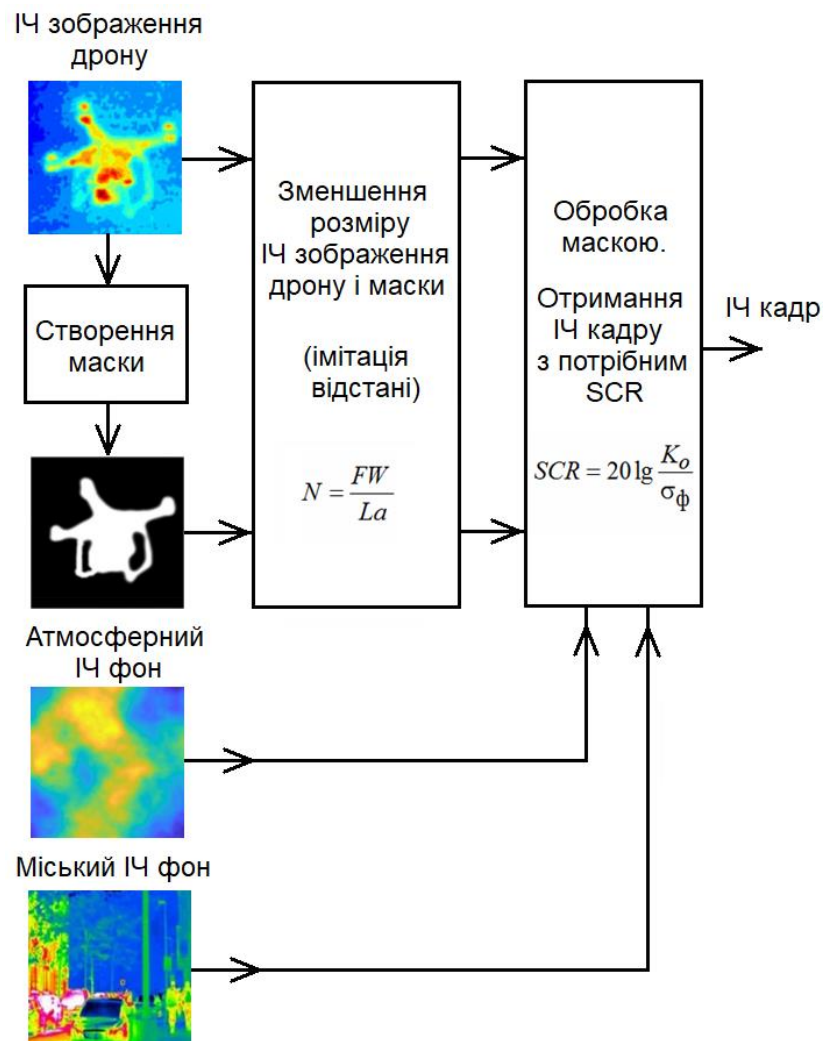


Рисунок 3.3 – Загальна схема отримання ансамблю ІЧ зображень дронів на заданому фоні

Для отримання тестових тепловізійних зображень дронів був використаний тепловізор FLIR TG167. Він оснащений матрицею 80 x 60, яка в комплекті з фіксованою оптикою (кут огляду 25° x 19.6°) забезпечує чутливість 150 мК (NETD), і просторову роздільну здатність 5,6 мрад (0,32°).

Отримання зображень дронів відбувалося в прохолодний похмурий день (-1°C) в польових умовах. В експерименті використано дрон DJI Phantom 3 SE з горизонтальним розміром близько 0,33 м. Тестові польоти відбувалися на відстані до 20 м. Набір тестових зображень з різних ракурсів був отриманий після 10-хвилинного прогріву дрону з подальшими зависаннями на висотах 1...5 м. В результаті сформовано ансамбль з 60 зображень дрону розміром 60 x 60. Звертає на себе увагу, що крім акумуляторної батареї дрону та двигунів суттєвий нагрів має і його бортова камера.

Для формування моделі фону програмно формувалися дискретні двовимірні реалізації яскравості

$$L_{\phi}(x, y) = \Delta L_{\phi}(x, y) + \bar{L}_{\phi}, \quad (3.4)$$

де $\Delta L_{\phi}(x, y)$ – флуктуації теплової яскравості фону;

\bar{L}_{ϕ} – середня тепла яскравість фону.

Статистичні характеристики $L_{\phi}(x, y)$ по сукупності m реалізацій наближаються до характеристик реального атмосферного теплового шуму при $m \rightarrow \infty$.

Процес $L_{\phi}(x, y)$ у просторі повністю визначається законом розподілу вірогідності $p(L_{\phi})$ та просторовим спектром $\Phi(v_x, v_y)$. За даними роботи [28] закон розподілу флуктуацій $\Delta L_{\phi}(x, y)$ для атмосфери близький до біноміального, а просторовий спектр досить точно апроксимується функцією

(2). Відповідний алгоритм програмної побудови моделі атмосферного фону $L_{\phi}(x, y)$ наведено на рис.3.4.

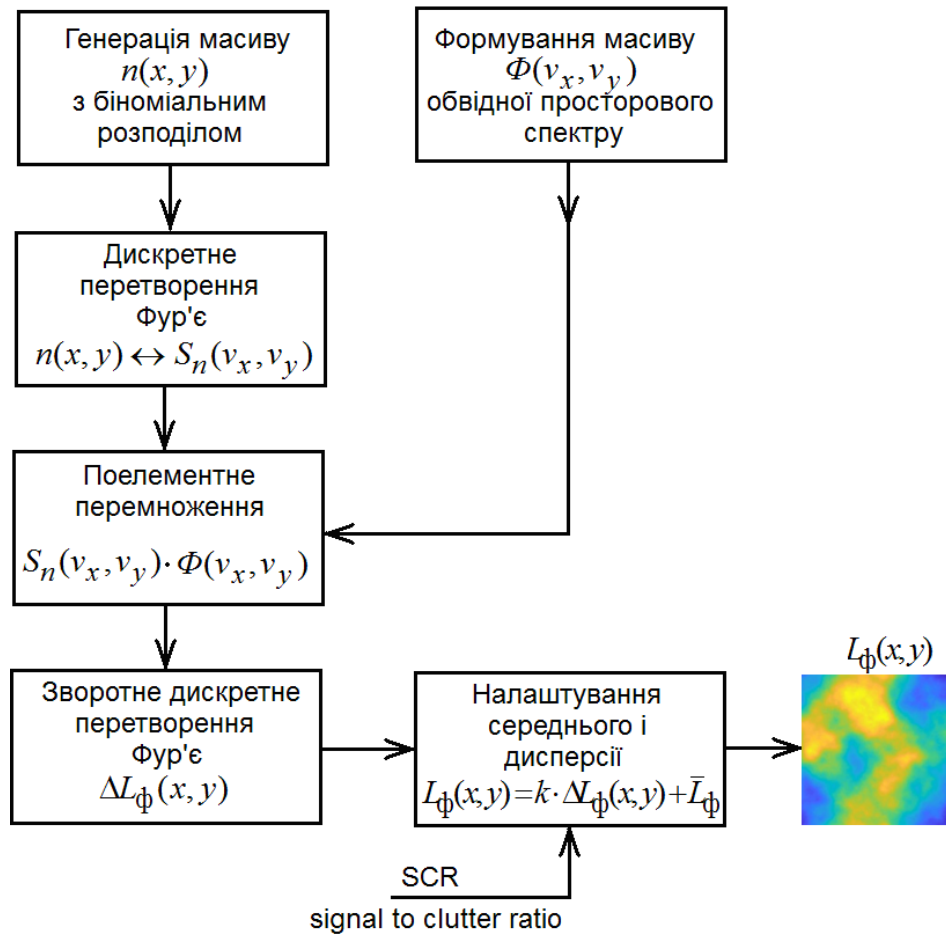


Рисунок 3.4 – Структурна схема програмної побудови моделі атмосферного фону

Тепловізійні зображення міського фону були отримані в ході натурального експерименту або взяті з відкритого доступу в Інтернеті.

3.4 Результати експерименту та їх обговорення

Першим етапом під час навчання нейронної мережі є підготовка бази даних зображень. Було згенеровано 180 ГЧ кадрів дрону з різних ракурсів на різних відстанях від тепловізора. Використано 3 типи фону: атмосферний (модель), дерева або кущі, багатоповерхові будинки.

Для кожного кадру було виконано розмітку. Область знаходження дрону є прямокутником. Програма розмітки зберігає координати лівої верхньої вершини, висоту h і ширину b прямокутника відносно висоти H і ширини B повного кадру (рис.3.5).

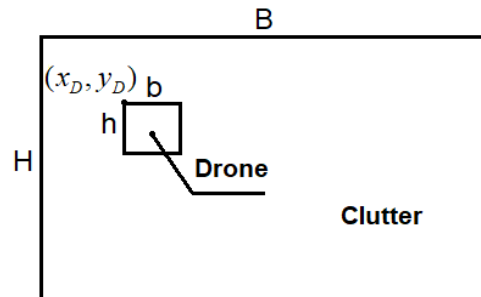


Рисунок 3.5 – Визначення координат в програмі розмітки

Нормовані значення h/H та b/B дозволяють надалі легко перерахувати розмір зображення і прямокутника перед подачею на нейронну мережу.

Ми розробили власну програму для генерації зображень з потрібним фоном і заданим SCR, виконання розмітки та створення файлів результатів розмітки. Для всіх 180 зображень було виконано розмітку, а після цього вся сукупність фотографій розбита на 2 групи. Перша група використовувалася для навчання, а друга для тестування навченої нейронної мережі. У першу групу випадковим чином було відібрано 150 зображень, а в другу – 30.

Для поліпшення якості навчання нейронної мережі сформовані зображення з рівноймовірним розташуванням об'єкта пошуку в межах кадру 320 x 320. Приклади сформованих ГЧ зображень показані на рис.3.6.

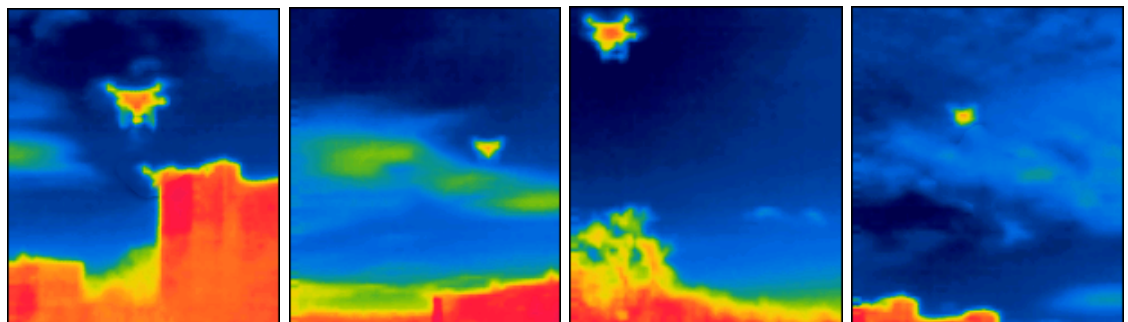


Рисунок 3.6 – Приклади сформованих ГЧ зображень

В алгоритмі YOLOv5 використовується 4 різновиди нейронної мережі: s, m, l, x. Вони відрізняються складністю мережі (кількістю шарів та нейронів). Вагові коефіцієнти найпростішої мережі мають обсяг 15 Мбайт, а найскладнішої 180 Мбайт. У s мережі 224 шари і $7,2 \cdot 10^6$ параметрів, в m мережі 308 шарів і $21 \cdot 10^6$ параметрів, в l мережі 392 шари і $47 \cdot 10^6$ параметрів, в x мережі 476 шарів і $87 \cdot 10^6$ параметрів.

При навчанні нейронних мереж існує 2 підходи: навчання всіх шарів мережі та часткове навчання лише частини мережі (групи останніх шарів). Другий підхід використовується для скорочення часу навчання та при обмеженій кількості навчального датасету. У нашому випадку навчальний датасет був малий, але ми використовували GPU для прискорення обчислень та 300 епох для навчання. Тому було обрано перший підхід – навчання всіх шарів.

Для контролю процесу навчання мереж застосовувалися наступні параметри:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (3.5)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3.6)$$

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i, \quad AP = \frac{1}{21} \sum_{r \in \{0,0.05 \dots 1\}} Precision(r) \cdot Recall(r), \quad (3.7)$$

де TP (True Positive) – вірогідність правильної ідентифікації дрону в кадри;

FP (False Positive) – вірогідність неправильної класифікації дрону;

FN (False Negative) – вірогідність не ідентифікації дрону,

mAP (Mean Average Precision) – усереднена по класам середня точність,

N – кількість класів об'єктів (у нашому випадку $N = 1$),

AP (Average Precision) – середня точність.

Середня точність була розрахована як приблизна площа під кривою $Precision \cdot Recall$, інтерпольованою в 21 точці від 0 до 1 з кроком 0,05.

Також контролювалися параметри:

– `box_loss` – втрата регресії обмежуючого прямокутника (середньоквадратична помилка),

– `obj_loss` – ентропія впевненості у наявності об'єкта (Binary Cross Entropy).

Результат навчання мережі s представлений на графіках рис.3.5, а, мережі m – рис.3.5, б, мережі l – рис.3.6, а, мережі x – рис.3.6, б.

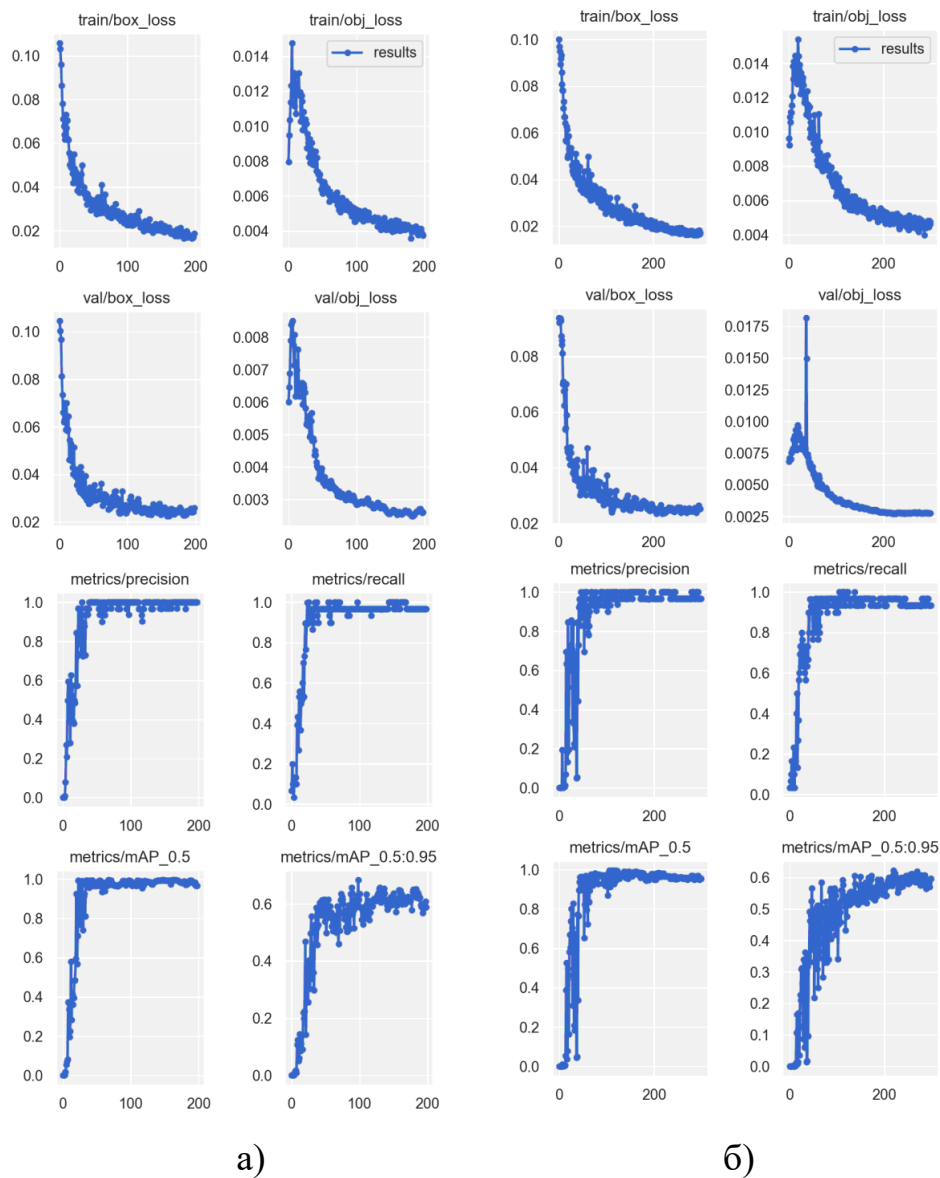


Рисунок 3.5 – Результат навчання мережі s (а) і мережі m (б)

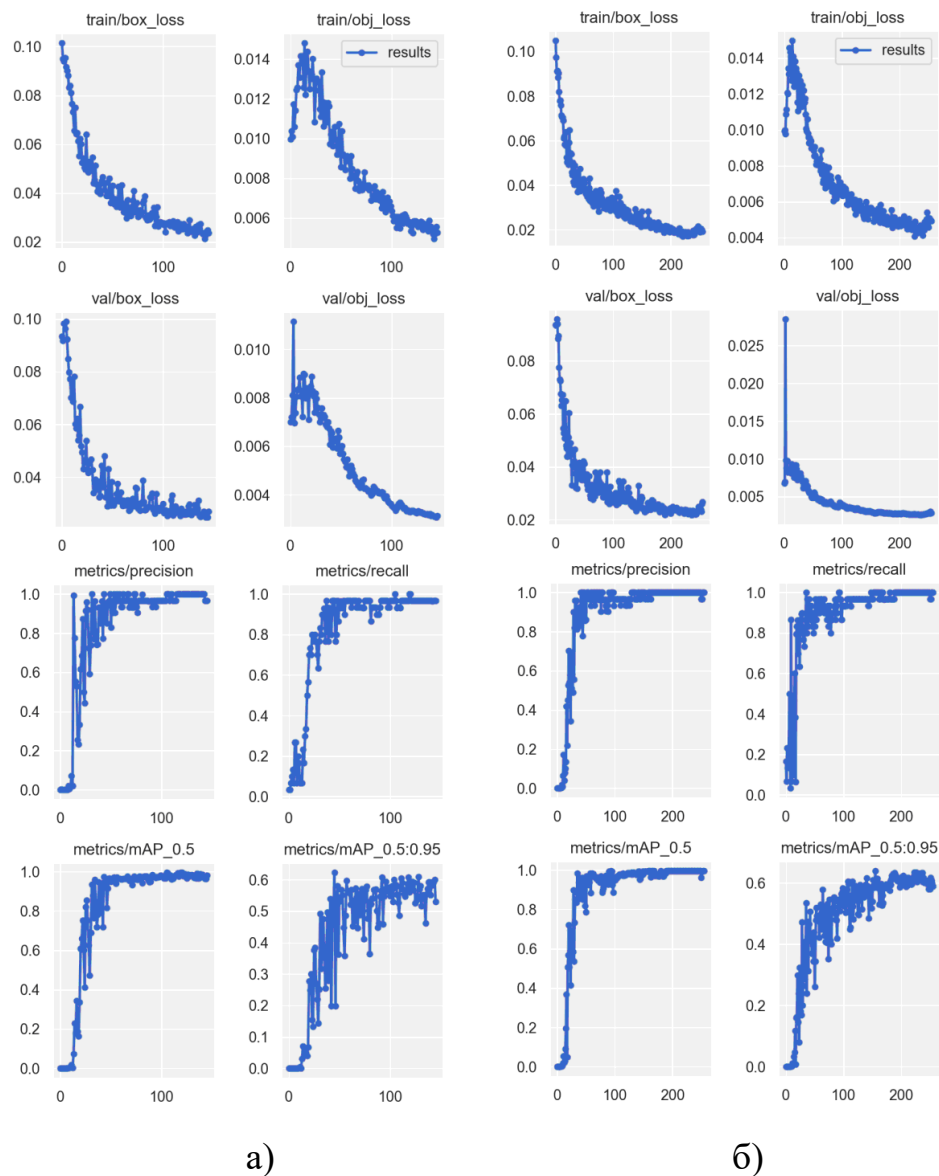


Рисунок 3.6 – Результат навчання мережі 1 (а) і мережі x (б)

На графіках рис.3.5 – рис.3.6 «mAP_0,5» – це середня точність при пороговому значенні IoU=0,5 (Intersection over Union – перетин над об'єднанням), «mAP_0,5:0,95» – це середнє значення mAP за різними пороговими значеннями IoU в діапазоні від 0,5 до 0,95. Докладніше про методику розрахунку можна прочитати у [29].

Для перевірки ефективності роботи нейронної мережі використовується крива *Precision-Recall*, яка отримується в результаті обробки тестової вибірки зображень на навченій мережі. Результати перевірки ефективності виявлення дронів на ІЧ зображеннях мережами

YOLOv5 показані на рис.3.7. Рис.3.7, а відповідає мережі s, рис.3.7, б – мережі m, рис.3.7, в – мережі l, рис.3.7, г – мережі x.

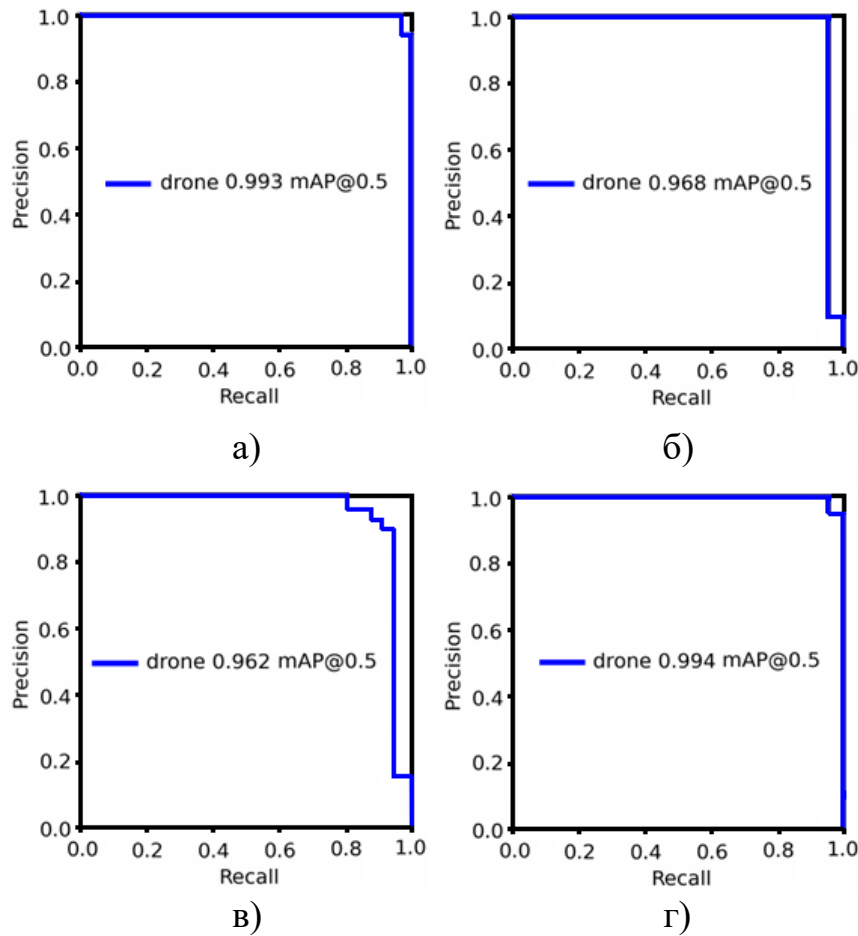


Рисунок 3.7 – Результати перевірки ефективності виявлення дронів на ІЧ зображеннях мережами YOLOv5 (а – мережа s, б – мережа m, в – мережа l, г – мережа x)

Отримані результати показали, що всі протестовані мережі YOLOv5 s, m, l, x показали гарний результат з виявлення дронів в ІЧ діапазоні. Всі моделі забезпечили середню точність більше 0,96 при IoU=0,5. Близькі результати можна пояснити тим, що оброблювані зображення мали невисоку роздільну здатність 320 x 320. Це не дозволило отримати достатню кількість ознак та їх градієнтів для повного розкриття можливостей нейронних мереж зі складнішою структурою. Такі структури орієнтовані на зображення з роздільною здатністю 608 x 608 пікселів і більше.

Цілком очікувано найкращу ефективність з виявлення дронів в ІЧ зображеннях показала мережа x . Вона забезпечила середню точність 0,994 при $IoU=0,5$.

Отже, при обробці ІЧ теплових зображень з роздільною здатністю 320×320 для практичного використання можна рекомендувати мережу s , яка забезпечує найвищу швидкодію. При обробці ІЧ зображень більшої роздільної здатності варто застосовувати мережу x . Вона має більший потенціал для виявлення додаткових ознак та їх градієнтів, що містяться в зображеннях з високим розрізненням.

Щодо глибини навченості досліджених мереж можна зазначити наступне. При стандартному навчанні мереж YOLOv5 використовується 200 епох для 80 класів зображень з набору даних COCO [28]. В нашому випадку використано 300 епох навчання. Причому це не додаткове навчання попередньо навченої мережі, а навчання ненавченої мережі з початку. Тобто можна стверджувати, що в нашому дослідженні глибина навчання мереж більш ніж достатня.

3.4 Висновки по розділу 3

В результаті досліджень було розроблено алгоритм і програму для генерації набору тестових ІЧ зображень дронів на міському, природному та атмосферному фоні з довільним відношенням сигнал-фон. Отримана база ІЧ зображень використана для навчання нейронних мереж YOLOv5. Даний алгоритм і програма може бути використана надалі для генерації набору тестової бази даних ІЧ зображень будь-яких інших об'єктів.

Всі навчені мережі YOLOv5 s , m , l , x показали середню точність більше 0,96 при $IoU=0,5$. Найкращу ефективність з виявлення дронів в тепловому ІЧ діапазоні показала мережа x з середньою точністю 0,994 при $IoU=0,5$.

Зазначені результати залишаються майже незмінними при відношенні сигнал-фон $SCR > 2$. Тобто, для надійного виявлення потрібен хоча б

невеликий контраст об'єкту з фоном. При $SCR < 2$ точність виявлення сильно зменшується. Деревя, кущі, атмосферний фон майже не впливають на точність. Розпізнавання дронів на фоні будинків є практично неможливим. В той же час вдень видиме зображення дрону на фоні будинку методом YOLO можна легко розпізнати [30]. Отже, тепловий ІЧ канал слід розглядати як резервний в умовах недостатньої видимості або додатковий.

Для надійного виявлення дронів на великій відстані вирішальне значення має роздільна здатність ІЧ зображення. Для практичного використання при роботі з ІЧ тепловими зображеннями з роздільною здатністю 320×320 можна рекомендувати найбільш швидку мережу YOLOv5 s. При роботі з ІЧ зображеннями більшої роздільної здатності рекомендується використовувати мережу YOLOv5 x. Вона має більший потенціал для виявлення додаткових ознак та їх градієнтів, що містяться в зображеннях з високим розрізненням.

ВИСНОВКИ

З появою середніх та малих безпілотних літальних апаратів завдання протидії їх застосуванню у особливо контрольованих зонах суттєво актуалізувалися. Регулярно з'являють повідомлення про небезпечне використання малих БПЛА в районах аеропортів, для ведення несанкціонованого спостереження важливих об'єктів, проведення терактів та диверсій, перенесення заборонених вантажів та широке використанні БПЛА у військовій справі.

Найбільше складними об'єктами виявлення, для сучасних засобів розвідки є малі БПЛА. Для їх виявлення використовують засоби радіолокаційної, радіо- та радіотехнічної, оптико-електронної та акустичної розвідок.

В даній роботі розглядається тепловізійний канал, який може бути застосований в умовах недостатньої видимості.

Мета роботи – отримати числові оцінки дальності дії тепловізійного каналу з врахуванням чутливості і роздільної здатності системи, оцінити ефективність виявлення малих дронів в тепловізійному каналі методом YOLOv5 з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

В результаті аналізу вияснено, що успішно вирішити задачу автоматизованого виявлення БПЛА в тепловізійному каналі можливо за при виконанні трьох головних умов: тепловий контраст об'єкта більше ніж чутливість системи, розмір об'єкта більше просторової роздільної здатності системи, система автоматичної детекції здатна виявити об'єкт на зображенні з заданим відношенням сигнал шум, роздільною здатністю при заданих вірогідностях правильного виявлення і хибної тривоги.

Розраховано чутливість і дальність дії тепловізійного каналу. Виведене співвідношення, за яким побудовано функцію виявлення для знаходження дальності по тепловому контрасту дрону. Розрахунки проведені для метеорологічної видимості більше 1 км для довжини хвилі 10 мкм. З графіків

виявлено, що розмір цілі є вирішальним для тепловізійного виявлення дрону. Для виявлення БПЛА розміром 0,33 м на відстані 1 км, потрібен тепловий контраст об'єкта з фоном 30 К. В той же час, для виявлення дрону розміром 1 м достатньо буде температурного контрасту 3 К.

Важливим фактором також є відношення сигнал-шум, при якому зможе працювати система. При $SNR=20$ дБ для виявлення дрону розміром 0,33 м на відстані 1 км потрібен тепловий контраст об'єкта з фоном 100 К. В той же час, при відношенні $SNR=10$ дБ буде достатньо теплового контрасту 30 К. Отже, для навчання і тестування нейронної мережі потрібно мати зображення з різним тепловим контрастом і відношенням сигнал-шум.

Показано, що задача ідентифікації є набагато складнішою за задачі виявлення і розпізнавання, і вимагає великого теплового контрасту і розміру об'єкта. Тому її вирішення треба ставити в найостаннішу чергу. Для задач безпеки перш за все важливі задачі виявлення та ідентифікації БПЛА, які можуть бути вирішені при набагато менших теплових контрастах, відношеннях сигнал-шум, метеорологічних видимостях та на більших відстанях.

Важливим обмежуючим фактором для надійного виявлення, розпізнавання і ідентифікації малорозмірних БПЛА є мінімальний розмір зображення БПЛА N_{el} в площині теплочутливої матриці. Отримані залежності N_{el} від відстані для малих дронів площею 0,1, 0,25 і 0,5 м². Розраховано графіки максимальних дальностей виявлення, розпізнавання і ідентифікації в залежності від фокусної відстані системи з матрицею 640×480 елементів і кроком пікселів 17 мкм.

Для фокусних відстаней 50 до 200 мм максимальна дальність виявлення БПЛА DJI Phantom 3 розміром 33 см x 30 см становить від 0,5 до 1,8 км, розпізнавання – від 120 до 460 м, ідентифікації – від 60 до 240 м.

Проведено експеримент з оцінки ефективності виявлення малих дронів у інфрачервоному діапазоні за допомогою нейронних мереж YOLOv5. На відміну від видимого діапазону, у відкритому доступі не існує великої

кількості зображень дронів в тепловому діапазоні. Для отримання великого ансамблю теплових зображень з метою навчання нейронної мережі потрібен сучасний тепловізор з високою роздільною здатністю. Такі тепловізори мають значну вартість і крім того, вкрай потрібні ЗСУ. В наших дослідженнях використано тепловізор-пірометр початкового рівня з невисокою роздільною здатністю. Методика дослідження побудована таким чином, щоби шляхом обробки теплових зображень отримати потрібний масив зображень дронів в тепловому діапазоні на різному фоні з різним відношенням сигнал-фон.

Було отримано 60 тепловізійних зображень дрону в різних ракурсах з близької відстані з розрізненням 60 x 60. Точно так же отримано ряд тепловізійних фонових зображень різних об'єктів – будинків, дерев, хмар.

Для моделювання знаходження об'єкту на певній відстані пропорційно зменшувався розмір N тестових зображень з врахуванням параметрів тепловізійної системи і фізичного розміру об'єкта спостереження. Для моделювання атмосферного фону до тепловізійного зображення додавався сигнал фонових утворень з відповідним законом розподілу. В результаті обробки маскою отримано потрібну кількість зображень дронів з різних відстаней, зміщенням і з різними значеннями відношення сигнал/фон.

Для всіх 180 зображень було виконано розмітку, а після цього вся сукупність фотографій розбита на 2 групи. Перша група використовувалася для навчання, а друга для тестування навченої нейронної мережі. У першу групу випадковим чином було відібрано 150 зображень, а в другу – 30.

При навчанні нейронних мереж існує 2 підходи: навчання всіх шарів мережі та часткове навчання лише частини мережі (групи останніх шарів). Було обрано перший підхід – навчання всіх шарів.

Для контролю процесу навчання мереж застосовувалися стандартні параметри: *Precision*, *Recall*, Mean Average Precision та Average Precision.

Всі навчені мережі YOLOv5 s, m, l, x показали середню точність більше 0,96. Найкращу ефективність з виявлення дронів в тепловому ІЧ діапазоні показала мережа x з середньою точністю 0,994.

Зазначені результати залишаються майже незмінними при відношенні сигнал-фон $SCR > 2$. Тобто, для надійного виявлення потрібен хоча б невеликий контраст об'єкту з фоном. При $SCR < 2$ точність виявлення сильно зменшується. Деревя, кущі, атмосферний фон майже не впливають на точність. Розпізнавання дронів на фоні будинків є практично неможливим. В той же час вдень видиме зображення дрону на фоні будинку методом YOLO можна легко розпізнати. Отже, тепловий канал слід розглядати як резервний в умовах недостатньої видимості або додатковий.

Для надійного виявлення дронів на великій відстані вирішальне значення має роздільна здатність ІЧ зображення. Для практичного використання при роботі з ІЧ тепловими зображеннями з роздільною здатністю 320x320 можна рекомендувати найбільш швидку мережу YOLOv5 s. При роботі з ІЧ зображеннями більшої роздільної здатності рекомендується використовувати мережу YOLOv5 x. Вона має більший потенціал для виявлення додаткових ознак та їх градієнтів, що містяться в зображеннях з високим розрізненням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1 Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М. : Мир, 1978. – 416 с.
- 2 Джемисон Дж. Э. и др. Физика и техника инфракрасного излучения. – Советское радио, 1965. – 642 с.
3. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – Мир, 1972. – 535 с.
4. Криксунов Л. З., Усольцев, И. Ф. Инфракрасные системы. – Советское радио, 1968. – 320 с.
5. Тарасов В.В., Якушенков, Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : Логос, 2004. – 452 с.
6. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Учебник для вузов. – М.: Логос, 2004. – 480 с.
7. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы. – Логос, 2007. – 192 с.
8. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебное пособие для втузов. – Л.: Машиностроение, 1977. – 600 с.
9. Певцев Е., Черно книжин В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. – 2001. – №1. – С. 32–36; № 2. – С. 30–34; № 3. – С. 12–20.
10. Волков В. Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения // Журнал «Специальная техника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://st.ess.ru/publications/2_2001/volkov/volkov.htm.
11. S. A. Musa et al. A review of copter drone detection using radar systems // Def. S&T Tech. Bull., vol. 12, no. 1, 2019, pp. 16–38.
12. S. Al-Emadi, F. Al-Senaid. Drone Detection Approach Based on Radio-Frequency Using Convolutional Neural Network // 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies (ICIoT), 2020, pp. 29–34.
13. V. N. Oleynikov, O. V. Zubkov, V. M. Kartashov, I. V. Korytsev, S. I. Babkin, S.A. Sheiko. Investigation of detection and recognition efficiency of small

unmanned aerial vehicles on their acoustic radiation // *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol. 78 (9), pp. 759–770.

14. V. Kartashov, V. Oleynikov, I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin, I. Selieznov. Use of Acoustic Signature for Detection, Recognition and Direction Finding of Small Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020, 4 p.

15. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, I. Koryttsev, S. Babkin, S. Sheiko, M. Kolendovskaya. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles // *Telecommunications and Radio Engineering*, 2020, vol. 79 (9), pp. 769–780.

16. I. Koryttsev et al. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020, pp. 318-322.

17. O. Zubkov, S. Sheiko, V. Oleynikov, V. Kartashov, S. Babkin. Investigation of efficiency of detection and recognition of drone images from video stream of stationary video camera // *Telecommunications and Radio Engineering*, 2021, vol. 80 (3), pp. 23–37.

18. V. Kartashov, V. Oleynikov, S. Sheyko, I. Koryttsev, S. Babkin, O. Zubkov. Peculiarities of small unmanned aerial vehicles detection and recognition // *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, vol 78 (9), pp. 771–781.

19. Holst G.C. *Electro-Optical Imaging System Performance*. Bellingham: SPIE Press, 2003. – 462 p.

20. J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick and A. Farhadi. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, pp. 779–788.

21. Jung, Hyun-Ki, Gi-Sang Choi. Improved YOLOv5: Efficient Object Detection Using Drone Images under Various Conditions // *Applied Sciences* 12, 2022, no. 14: 7255.

22. Chandra Has Singh, Kamal Jain. An enhanced YOLOv5 based on Color Harmony Algorithm for object detection in Unmanned Aerial Vehicle captured Images // PREPRINT (Version 1), 28 July 2022, 18 p.
23. N. Al-Qubaydhi et al. Unauthorized Unmanned Aerial Vehicle Detection using YOLOv5 and Transfer Learning // Preprints, 2022, 2022020185, 15 p.
24. S. Li, Y. Li, Y. Li, M. Li, X. Xu. YOLO-FIRI: Improved YOLOv5 for Infrared Image Object Detection // IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 141861-141875.
25. Chenchen Jiang et al. Object detection from UAV thermal infrared images and videos using YOLO models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2022, vol. 112, 102912, 17 p.
26. Jianyuan Li, Chunna Liu, Xiaochun Lu, Bilang Wu. CME-YOLOv5: An Efficient Object Detection Network for Densely Spaced Fish and Small Targets // Water 14, 2022, no. 15, 12 p.
27. P. Andraši, T. Radišić, M. Muštra, J. Ivošević. Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera // Transportation Research Procedia, 2017, vol. 28, pp. 183–190.
28. J. M. Lloyd. Thermal Imaging Systems. Plenum Press, 1975 – 456 p.
29. YOLOv5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://github.com/ultralytics/yolov5>. – Дата доступу: 02.01.2022.
30. COCO – Common Objects in Context. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cocodataset.org/>. – Дата доступу: 15.02.2022.
31. Методичні вказівки з виконання атестаційної магістерської роботи за спеціальністю 8.05090102 «Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення». Освітньо-кваліфікаційний рівень – магістр / Упоряд. В.М. Карташов, В.А. Тихонов, І.В. Савченко – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 68 с.