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 малих БПЛА у ближньому інфрачервоному діапазоні___
_____
(тема)

Виконав:
студент _2__ курсу, групи ___МІм-21-1____
_____Зінченко М.Р._____
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 Телекомунікації та_____
_____радіотехніка_____
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми ___освітньо-професійна____
Освітня програма ____Медіаінженерія____
(повна назва освітньої програми)

Керівник _____доц. Ликов Ю.В._____
(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 Зінченку Максиму Романовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система виявлення малих БПЛА у ближньому 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 Провести аналіз характеристик та параметрів телевізійних систем. Виконати теоретичні оцінки характеристик системи виявлення БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні. Провести енергетичний розрахунок системи з інфрачервоним підсвічуванням об'єкта, енергетичний розрахунок матричної системи інфрачервоного підсвічування об'єкта. Виконати розрахунок чутливості камери в ближньому інфрачервоному діапазоні. Обгрунтувати експеримент з дослідження системи виявлення БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні. Дослідити просторові характеристики випромінення інфрачервоного прожектора. Скласти та реалізувати алгоритм отримання інфрачервоних зображень з заданим відношенням сигнал-шум._

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
__Вступ_____
__1. Аналіз характеристик та параметрів телевізійних систем._____
__2. Теоретичні оцінки характеристик системи виявлення БПЛА_____
в ближньому інфрачервоному діапазоні._____
__3. Обгрунтування експерименту з дослідження системи виявлення БПЛА____
в ближньому інфрачервоному діапазоні._____
__Висновки_____
__Перелік посилань_____
__Додатки_____

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

1. Методи моніторингу та виявлення БПЛА (1 аркуш А4).
2. Постановка задачі (1 аркуш А4).
3. Класична інфрачервона підсвітка (1 аркуш А4).
4. Матрична LED система ІЧ підсвічування (1 аркуш А4).
5. Результати енергетичних розрахунків (1 аркуш А4).
6. Врахування чутливості камери (1 аркуш А4).
7. Алгоритм досліджень ІЧ системи (1 аркуш А4).
8. Методи отримання ІЧ зображень (1 аркуш А4).
9. Дослідження характеристик плями ІЧ прожектора (1 аркуш А4).
10. Характеристики плями реального ІЧ прожектора (1 аркуш А4).
11. Зашумлені ІЧ зображення БПЛА (1 аркуш А4).
12. 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	Енергетичні розрахунки системи	14.09.22–27.09.22	
3	Оцінка чутливості камери в ІЧ діапазоні	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 _____ Максим ЗІНЧЕНКО
(підпис)

Керівник роботи _____ Юрій ЛИКОВ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 69 сторінок, 25 рисунків, 2 таблиці, 35 джерел.

БПЛА, ВІДЕО, ВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ-ШУМ, ВИЯВЛЕННЯ, ДРОН, ІНФРАЧЕРВОНИЙ, ОСВІТЛЕНІСТЬ, ПІДСВІЧЕННЯ, ЧУТЛИВІСТЬ

Об'єкт дослідження – процеси випромінення, приймання і обробки сигналів ближнього інфрачервоного діапазону для задачі виявлення, розпізнавання та ідентифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності дії ближнього інфрачервоного каналу з врахуванням енергетичних характеристик підсвічення, чутливості і спектральних характеристик відеокамер в ближньому інфрачервоному діапазоні.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання.

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз характеристик та параметрів телевізійних систем. Виконано теоретичні оцінки характеристик системи виявлення БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні: проведено енергетичний розрахунок системи з інфрачервоним підсвічуванням об'єкта, проведено енергетичний розрахунок матричної системи інфрачервоного підсвічування об'єкта, виконано розрахунок чутливості камери в ближньому інфрачервоному діапазоні. Обгрунтувано експеримент з дослідження системи виявлення БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні. Досліджено просторові характеристики випромінення інфрачервоного прожектора. Складено та реалізовано алгоритм отримання інфрачервоних зображень з заданим відношенням сигнал-шум.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 69 pages, 25 figures, 2 tables, 35 sources.

UAV, VIDEO, SIGNAL-TO-NOISE RATIO, DETECTION, DRONE, INFRARED, LIGHT, BACKLIGHT, SENSITIVITY

The object of research is the processes of emission, reception and processing of signals in the near-infrared range for the task of detection, recognition and identification of unmanned aerial vehicles (UAVs).

The purpose of the study is to obtain numerical estimates of the range of the near-infrared channel, taking into account the energy characteristics of illumination, sensitivity and spectral characteristics of video cameras in the near-infrared range.

Research methods – theoretical analysis, numerical calculations, mathematical modeling.

In the qualification work, the characteristics and parameters of television systems were analyzed. Theoretical evaluations of the characteristics of the UAV detection system in the near-infrared range were carried out: the energy calculation of the system with infrared illumination of the object was carried out, the energy calculation of the matrix system of infrared illumination of the object was carried out, the sensitivity of the camera in the near-infrared range was calculated. The experiment on the research of the UAV detection system in the near-infrared range is substantiated. The spatial characteristics of the radiation of an infrared searchlight were studied. An algorithm for obtaining infrared images with a given signal-to-noise ratio was developed and implemented.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць,
скорочень і термінів……8
Вступ……..9
1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПАРАМЕТРІВ
ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ……..….11
1.1 Інформативні параметри візуальної інформації……..11
1.2 Градаційна характеристика телевізійної системи……18
1.3 Просторово-частотна, частотно-контрастна
та перехідна характеристики телевізійної системи……20
1.4 Енергетична та контрастна чутливості телевізійної системи…….25
1.5 Висновки по розділу 1……27
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ
ВИЯВЛЕННЯ БПЛА В БЛИЖНЬОМУ
ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ……29
2.1 Енергетичний розрахунок системи
з інфрачервоним підсвічуванням об'єкта……..…..29
2.2 Енергетичний розрахунок матричної системи
інфрачервоного підсвічування об'єкта……....34
2.3 Розрахунок чутливості камери в ближньому
інфрачервоному діапазоні……..…..38
2.4 Висновки по розділу 2……..…..45
3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ДОСЛІДЖЕННЯ
СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА В БЛИЖНЬОМУ
ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ……48
3.1 Постановка задачі……....48
3.2 Методи отримання фото- і відеозображень
в ближньому інфрачервоному діапазоні……50

3.3 Дослідження просторових характеристик випромінення
інфрачервоного прожектора…….53
3.4 Алгоритм отримання інфрачервоних зображень
з заданим відношенням сигнал-шум……...58
3.5 Висновки по розділу 3…….60
Висновки……62
Перелік джерел посилань……...……...66
ДОДАТКИ…….…70
Додаток А. Текст програми в MATLAB……...……..71
Додаток Б. Графічний матеріал……....72
Додаток В. Відомість кваліфікаційної роботи.....84

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ІЧ – інфрачервоний;

ПЧХ – просторово-частотна характеристика системи;

ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком;

ТВЛ – телевізійна лінія – одиниця вимірювання просторової частоти;

ФПМ – функція передачі модуля цілі;

ЧКХ – частотно-контрастна характеристика;

LED – Light-emitting diode – світлодіод.

4k, Full HD, HD – формати роздільної здатності відеозображення;

IP-камера – цифрова відеокамера, особливістю якої є передача відеопотоку в цифровому форматі через Ethernet і TokenRing, що використовує протокол IP;

E – енергетична опроміненість об'єкта, Вт/м^2;

E_0 – освітленість на об'єкті (БПЛА), лк;

F – діафрагмове число об'єктива.

PSNR – peak signal-to-noise ratio – пікове відношення сигнал-шум;

S – площа пікселя, м^2;

SNR – signal-to-noise ratio – відношення сигнал-шум;

τ_o – інтегральне значення коефіцієнта пропускання оптичної системи;

T_e – час експонування, с;

$\overline{W}_\phi = h\overline{\nu}$ – середня енергія фотона, Дж;

$\overline{\lambda}$=800 нм – середня довжина хвилі інфрачервоного прожектора;

ρ – коефіцієнт світловідбиття БПЛА;

τ – коефіцієнт інтегрального світлопропускання об'єктива;

$\overline{\nu}$ – середня частота випромінення джерела світла, Гц;

η – квантовий вихід.

ВСТУП

Безпілотний літальний апарат (БПЛА, у розмовній мові також безпілотник, дрон) – літальний апарат без екіпажу на борту. БПЛА можуть мати різний ступінь автономності – від керованих дистанційно до повністю автоматичних, а також відрізнятися за конструкцією, призначенням та безліччю інших параметрів.

Управління БПЛА може здійснюватися епізодичною подачею команд або безперервно – в останньому випадку БПЛА називають дистанційно-пілотованим літальним апаратом (ДПЛА). БПЛА можуть вирішувати розвідувальні завдання (на сьогодні це основне їх призначення), застосовуватися для завдання ударів по наземних і морських цілях, перехоплення повітряних цілей, здійснювати постановку радіоперешкод, управління вогнем і цілевказівки, ретрансляції повідомлень і даних, доставки вантажів.

Основною перевагою БПЛА/ДПЛА є суттєво менша вартість їх створення та експлуатації (за умови рівної ефективності виконання поставлених завдань). Важливим фактором є те, що оператор бойового БПЛА не ризикує своїм життям на відміну від пілота бойового літака. Недоліком БПЛА є вразливість систем дистанційного керування, що особливо важливо для БПЛА військового призначення.

Своєчасне виявлення і протидія БПЛА є важливою складовою безпеки, як у військовий, так і у мирний час. Для виявлення БПЛА використовують радіолокаційні, радіочастотні, акустичні і оптико-електронні методи, а також їх комплексування [1].

Оптико-електронне виявлення БПЛА в видимому діапазоні є досить ефективним методом, оскільки дозволяє не тільки виявляти дрон, але й відрізняти його від інших рухомих об’єктів, розпізнавати його тип і точно вимірювати його координати і параметри руху. Але така система має очевидний недолік, оскільки може працювати лише в світлу частину доби.

Існує тепловий канал виявлення дронів, який може працювати вночі, але сам малий БПЛА має досить мале теплове випромінення і малі розміри, що обмежує дальність дії теплового каналу. Крім того, тепловізор з високою роздільною здатністю є досить дорогим елементом системи.

В даній роботі розглядається канал виявлення в ближньому ІЧ діапазоні на довжинах хвиль 800…900 нм з підсвіченням. На відміну від світлового прожектора така система матиме візуальну скритність і не привертатиме до себе зайву увагу. В той же час, навіть з практики використання охоронних систем відеоспостереження відомо, що ближній інфрачервоний канал суттєво розширює можливості роботи системи в темний час доби або в умовах недостатньої освітленості.

Ближній інфрачервоний канал будемо розглядати як один з каналів у комплексній системі виявлення, розпізнавання, ідентифікації і пеленгації БПЛА.

Об'єкт дослідження – процеси випромінення, приймання і обробки сигналів ближнього інфрачервоного діапазону для задачі виявлення, розпізнавання та ідентифікації безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності дії ближнього інфрачервоного каналу з врахуванням енергетичних характеристик підсвічення, чутливості і спектральних характеристик відеокамер в ближньому інфрачервоному діапазоні.

Методи дослідження – теоретичний аналіз, числові розрахунки, математичне моделювання.

1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПАРАМЕТРІВ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМ

1.1 Інформативні параметри візуальної інформації

У більшості телевізійних систем передбачається візуальне отримання інформації. Це стосується не лише суто візуальних систем, а й телевізійних автоматів, у яких візуальний канал має допоміжне значення, граючи роль видошукача.

Зорове сприйняття зображень об'єктів у різних пристроях відображення інформації (екранах, індикаторних панелях та інших) можна розділити втричі стадії: виявлення, розрізнення і впізнавання [1-4].

Виявлення – це стадія зорового сприйняття, на якій спостерігач або система виділяє об'єкт з фону, але не може судити про його форму і ознаки, для виявлення необхідно виділяти в зображенні тільки обриси об'єкта або його великі деталі.

Розрізнення – це стадія зорового сприйняття, де спостерігач система здатні окремо сприймати два об'єкта, і навіть виділяти окремі деталі об'єктів.

Впізнання – це стадія зорового сприйняття, де спостерігач або система виділяють суттєві ознаки об'єкта і відносить його до певного класу. Розпізнавання потребує відтворення системою більшості дрібних деталей. На практиці при вирішенні різних завдань проектування зазвичай обмежуються двома поняттями: виявлення та розпізнавання.

Зорове сприйняття зображення залежить від низки незалежних інформаційних показників: кутових розмірів зображення об'єкта або його деталей, рівня адаптуючої яскравості, розмаїття між зображеннями об'єкта та фону, часу сприйняття зображення (рухливості об'єкта) та його зашумленості. З іншого боку, на процеси виявлення та розпізнавання об'єкта спостереження безпосередньо впливають характеристики зорового аналізатора оператора і насамперед контрастна чутливість зору.

Розглянемо коротко кожен із інформаційних показників зображення.

Кутові розміри.

Кутовий розмір зображення об'єкта визначається як кут між променями, спрямованими від очей оператора до крайніх точок зображення (рис. 1.1).

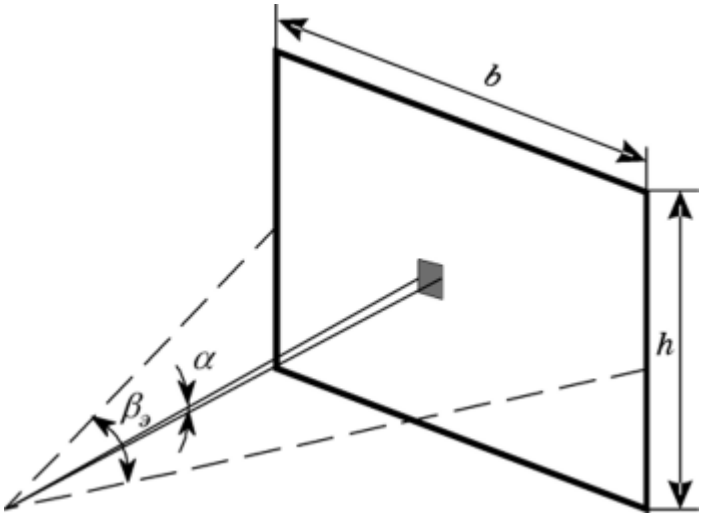


Рисунок 1.1 – До розрахунку кутового розміру зображення деталі об'єкта

Кутовий розмір визначають за формулою [5]

$$\alpha = 2 \cdot arctg \frac{S}{2H}, \qquad (1.1)$$

де S – лінійний розмір зображення об'єкта;

H – відстань до площини спостереження.\

Відстань H рекомендується вибирати в межах H = (4…5) h, де h – висота зображення на екрані. Для малих кутів $\alpha = S / H$. При розрахунках зручно користуватися також співвідношенням $\alpha = \beta \cdot S / b$, де β – кут, під яким спостерігається зображення на екрані; b – розмір растру у бік виміру розміру деталі S.

Вочевидь, що з кожної стадії зорового сприйняття порогові кутові розміри зображення будуть різними. Абсолютний поріг у більшості людей становить 0,5" (тонка чорна лінія на світлому фоні), що приблизно в 120 разів

менше, ніж порогова величина, яку в більшості розрахунків прийнято вважати рівною $\alpha_{пор} = 1'$.

Гостротою зору (роздільна здатність ока) називають величину $y = 1/\alpha_{пор}$, визначальну здатність роздільного бачення двох окремих предметів. Гострота зору залежить від контрасту зображення, відстані між сусідніми світлочутливими елементами сітківки ока, від форми предмета, що спостерігається, і місця його розташування на сітківці. Гострота зору вища для протяжних предметів і максимальна у центральній частині сітківки (приблизно у куті зору 7°).

Порогове значення кутового розміру $\alpha_{пор}$ залежить від яскравості фону $L_ф$. Цю залежність при розпізнаванні кільця Ландольта наведено в табл.1.1 [6].

Таблиця 1.1 – Порогове значення кутового розміру $\alpha_{пор}$ в залежності від яскравості фону $L_ф$

$L_ф$, кд/м^2	0,1	1,0	10	100	1000
$\alpha_{пор}$, ’	5,0	1,8	1,0	0,7	0,5

Яскравість зображення. Діапазон яскравостей, який може сприйматися оком, дуже широкий і становить 5…7 порядків. Однак робочий діапазон яскравостей набагато менший і залежить від рівня адаптації, тобто середньої яскравості поля зору, до якої пристосовується око. При низьких рівнях адаптації інтервал яскравостей, що розрізняються одночасно, становить приблизно 10:1, а при високих рівнях (денне світло) – 1000:1. Перехід від одного рівня адаптації до іншого потребує певного часу. Від рівня адаптації залежить гострота зору, причому оптимальним рівнем адаптації з цієї точки зору вважають 500…700 кд/м, що є максимальною яскравістю сучасних екранів.

Для оптимальних умов ока важливим є співвідношення яскравостей об'єктів, що знаходяться в полі зору:

– 3:1 – між робочим полем та близьким його оточенням;

– 10:1 – між робочим полем і далеким його оточенням;

– 20:1 – між джерелом світла та найближчим його оточенням;

– 40:1 – між найсвітлішим і найтемнішим місцем, яке потрапляє в поле зору.

Контраст зображення та контрастна чутливість зору. Будь-яке зображення характеризується контрастом яскравості. Під контрастом у випадку напівтонового зображення розуміється величина, що характеризує відмінність у яскравості окремих його ділянок. Від розмаїття елементів відтворюваного зображення залежить виявлення як великих, і дрібних деталей об'єкта, отже і їх сприйняття спостерігачем [7]. Визначимо контраст як відношення яскравостей двох ділянок зображення L_1 та L_2 до більшого значення L_2:

$$K = \frac{L_2 - L_1}{L_2}. \tag{1.2}$$

На практиці звичайними є випадки, коли одна з ділянок зображення служить фоном по відношенню до іншої, яка приймається за об'єкт.

Залежно від співвідношення яскравостей об'єкта та фону зручно розрізняти два види контрасту – прямий та зворотний [7]. При прямому контрасті яскравість зображення фону $L_ф$ більше яскравості зображення об'єкта L_o і тоді

$$K = \frac{L_ф - L_o}{L_ф}, \tag{1.3}$$

при зворотному контрасті

$$K = \frac{L_o - L_\phi}{L_o}. \qquad (1.4)$$

Контраст може виражатися як у відносних одиницях (0<К<1), так і у відсотках. Зазвичай контраст до 20% сприймається як малий, до 50% – як середній і понад 50% – як високий. Оптимальним при тривалому спостереженні є контраст зображення 85…90 % і вище.

Фактично при спостереженні зображень на екранах пристроїв, що відтворюють, доводиться мати справу з контрастами, набагато меншими оптимального. При цьому винахідлива і розрізняльна здатність зору залежить не тільки від кутового розміру зображення об'єкта та його яскравості, але й від контрасту. Із графіків, наведених на рис. 1.2, слідує, що при кутових розмірах об'єкта менше 1' його помітність може бути забезпечена лише при контрастах, близьких до 90…100 %. Впізнання об'єкта можливе при кутових розмірах, більших, ніж на рис. 1.2 [8].

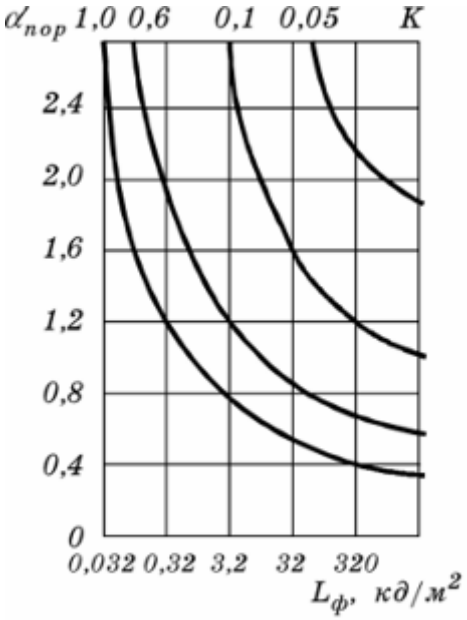


Рисунок 1.2 – Залежність порогових кутових розмірів $\alpha_{пор}$ розрізнюваних об'єктів від яскравості фону L_ϕ при різних значеннях контрасту K

За наявності зовнішнього засвітлення екрана контраст зображення знижується згідно з формулами: для прямого контрасту [7]

$$K' = \frac{K}{1 + L_з / L_ф}, \tag{1.4}$$

для зворотного контрасту

$$K' = \frac{K}{1 + L_з / L_o}, \tag{1.5}$$

де $L_з = \rho E_з / \pi$ – яскравість екрана від зовнішнього засвічення, що створює освітленість $E_з$ (ρ – коефіцієнт світловідбиття екрана).

Говорячи про контраст зображення, слід підкреслити, що ця величина є об'єктивною, тобто може бути виміряна одним із інструментальних способів. Разом з цим роздільна здатність ока визначається суб'єктивним його сприйняттям, чи інакше, відчуттям відносного збільшення яскравості – контрасту яскравості (Вебер, 1860).

Вперше закон зорового відчуття яскравостей експериментально встановлено Вебером і Фехнером. Цей закон випливає із співвідношення [9]

$$\Delta A = \theta \frac{\Delta L}{L}, \tag{1.6}$$

де ΔA – збільшення зорового відчуття яскравості у разі, коли одна з спостережуваних досить великих поверхонь (наприклад, напівкіл, рис. 1.3, а) має яскравість L, а інша – яскравість $L + \Delta L$;

θ – коефіцієнт пропорційності.

Вочевидь, що з граничної, тобто порогової, помітності обох поверхонь рівність (1.6) набуває вигляду

$$\Delta A_{пор} = \theta \frac{\Delta L_{пор}}{L}. \tag{1.7}$$

Беручи до уваги мале значення порогового розмаїття, формулу (1.7) можна подати у диференціальному вигляді

$$dA_{пор} = \theta \frac{dL_{пор}}{L}. \quad (1.8)$$

Якщо $\theta = const$, то

$$A = \theta \ln L + C_1. \quad (1.9)$$

де C_1 – постійна інтегрування.

Функція $A = f(\ln L)$ називається кривою зорового відчуття яскравостей, яка у разі $\theta = const$ має вигляд прямої похилої лінії. Крутизна цієї кривої дорівнює за умови $\Delta A_{пор} = 1$, як це випливає з рівняння (1.7)

$$\theta = \frac{L}{L_{пор}}. \quad (1.10)$$

Вебер і Фехнер показали, що відношення $L / L_{пор}$, зване пороговим контрастом $K_{пор}$, у широкому діапазоні яскравостей дійсно є постійною величиною приблизно дорівнює 1,7% (рис. 1.3) [9].

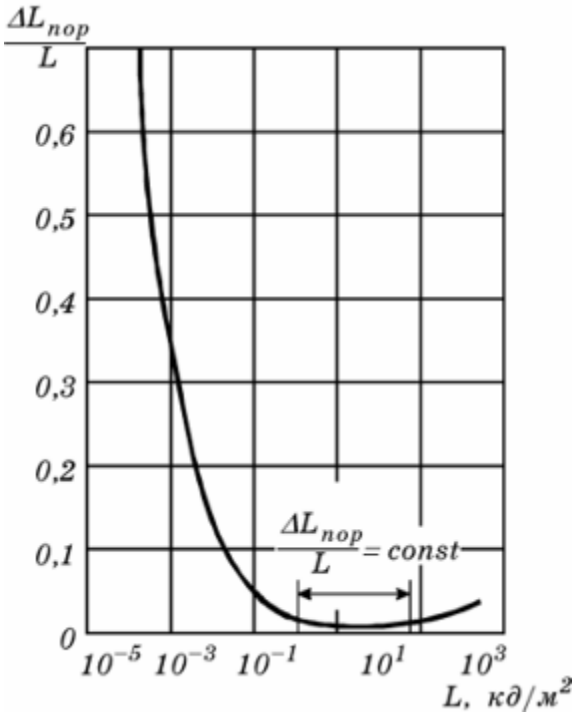


Рисунок 1.3 – Залежність порогового контрасту від яскравості фону

Величину $L / L_{пор}$, зворотну пороговому контрасту, називають контрастною чутливістю ока. Таким чином, закон Вебера-Фехнера може бути представлений у вигляді рівняння (1.9), з якого випливає, що зорове відчуття яскравості пропорційне логарифму самої яскравості.

На закінчення відзначимо, що оскільки порогова величина зорового відчуття $\Delta A_{пор}$ за своєю суттю є суб'єктивною, тобто не піддається прямому вимірюванню, раціонально в межах сталості порогового контрасту прийняти $\Delta A_{пор}$=1 і вважати її градацією зорового сприйняття яскравості. Зауважимо, що $\Delta L_{пор}$ є об'єктивною градацією яскравості.

1.2 Градаційна характеристика телевізійної системи

Градаційна (напівтонова) характеристика телевізійної системи, що визначає її нелінійні властивості, виражається залежністю [10]

$$\ln L = f(L'), \tag{1.11}$$

де L – яскравість зображення, що відтворюється на екрані;

L' – яскравість об'єкта.

Повна фізична подоба двох полів яскравостей L(x, y) та L’(x, y) матиме місце, очевидно, у разі виконання рівності [10]

$$L(x, y) = K_g L'(x, y), \tag{1.12}$$

де K_g – коефіцієнт пропорційності.

Звідси випливає співвідношення

$$L_{\max} / L_{\min} = L'_{\max} / L'_{\min} = K_g, \tag{1.13}$$

з якого випливає, що телевізійна система має повністю відтворювати динамічний діапазон яскравостей об'єкта. Однак це реально тільки для окремих випадків передачі по телевізійному каналу фотографій, поліграфічної та іншої аналогічної продукції і практично неможливе при відтворенні натурних об'єктів, динамічний діапазон яскравостей яких, як правило, дуже широкий.

Разом з тим не тільки в прикладному, а й у мовному телебаченні вимога фізичної подоби обох полів яскравостей не є обов'язковою. Обов'язковим є лише отримання необхідного обсягу зорової інформації про об'єкт або вимога, що випливає з художнього сприйняття сцени, що передається. При цьому можливе не тільки стиснення динамічного діапазону яскравостей об'єкта, а й, у разі потреби, явне спотворення закону розподілу градацій яскравості всередині цього діапазону.

Визначальним фактором є зорове враження від зображення, яке при заданих умовах спостереження та розмірах зображення об'єкта залежатиме від кривої зорових відчуттів яскравості $A = f(\ln L))$, де зорове відчуття яскравості A виражається в умовних одиницях зорового відчуття.

Розглянемо два випадки визначення градаційної характеристики телевізійної системи, що відповідають умовам $\theta = const$ та $\theta \neq const$, де θ – коефіцієнт у формулі (1.9).

$\theta = const$. Зорове відчуття градацій яскравості підпорядковується закону зорового сприйняття яскравостей, тобто психофізичному закону Вебера-Фехнера (1.9).

В такому випадку вираз для градаційної характеристики [11]

$$\ln L = \gamma \ln L' + \ln k_1, \qquad (1.14)$$

де $\ln k_1$ – постійна інтегрування.

З формули (1.14) слідує, що градаційна характеристика лінійна, якщо у $\theta = const$, причому цей випадок відповідає рівномірній та пропорційній

передачі градацій яскравості ΔA, виражених у світлових відчуттях. Якщо значення коефіцієнта γ не завжди всередині динамічного діапазону переданих яскравостей, то градаційна характеристика виявляється нелінійною.

Коефіцієнт γ часто називають коефіцієнтом контрастності, чисельно рівним показнику статечної функції, що випливає з рівняння (1.12):

$$L = k_1 (L')^{\gamma}, \tag{1.15}$$

де коефіцієнт $k_1 = L_{\max} /(L'_{\max})^{\gamma}$.

1.3 Просторово-частотна, частотно-контрастна та перехідна характеристики телевізійної системи

Будь-яке перетворення інформації, а також передача її каналом зв'язку завжди супроводжуються певними втратами. У телевізійній системі існують три види втрат інформації: просторові, градаційні та часові. Просторові втрати інформації пов'язані із зменшенням амплітуди окремих гармонійних складових, у тому числі складається вихідне зображення. Градаційні втрати визначаються зменшенням кількості рівнів енергії, переданих системою, а тимчасові втрати – максимально допустимою частотою знімання інформації, як правило, частоті зміни кадрів.

Здатність лінійної системи до передачі амплітуд сигналів всіх просторових частот, з яких складається вихідне зображення, визначається просторово-частотною характеристикою системи (ПЧХ), яка в одновимірному варіанті для поздовжнього напрямку x знаходиться з комплексної частотної характеристики [10]

$$v(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} a(x) e^{-j\omega x} dx, \tag{1.16}$$

де $a(x)$ – функція розсіювання точки (імпульсна характеристика системи);

ω – кругова просторова частота.

ПЧХ є модуль комплексної частотної характеристики $v(j\omega)$ [10]:

$$v(j\omega) = v(\omega)e^{-j\varphi(\omega)}. \qquad (1.17)$$

де $e^{-j\varphi(\omega)}$ – аргумент цієї характеристики.

Залежність $e^{-j\varphi(\omega)}$ є фазочастотною характеристикою системи (ФЧХ), яка за відсутності фазових спотворень є прямою похилою лінією.

У лінійній системі існує жорсткий зв'язок між комплексною частотною та перехідною $h(x)$ характеристиками системи [10]:

$$h(x) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{j\omega}v(j\omega)e^{j\omega x}d\omega. \qquad (1.18)$$

Цей зв'язок встановлюється також співвідношенням (1.16), оскільки справедлива рівність $a(x) = dh(x)/dx$. Отже, просторові втрати інформації залежать від форми перехідної характеристики.

В оптиці та фотографії просторові частоти N вимірюються числом періодів гармонійної складової зображення, що припадають на один міліметр [10]:

$$N = 1/X, \quad \omega = 2\pi N, \qquad (1.19)$$

де X – період гармонійної складової, виражений у міліметрах.

У телебаченні просторову частоту виражають числом напівперіодів m гармонійної складової зображення, що укладаються не на одиницю довжини, а на довільну висоту растру h, тобто $m = 2h / X$, і, отже, $\omega = nm / h$.

Величини h і X можна вимірювати як у міліметрах, так і числом рядків розкладання, причому в останньому випадку $\omega = nm / Z$, де Z – число рядків розкладання. Одиницею вимірювання просторової частоти є телевізійна лінія (ТВЛ). Зі сказаного випливає, що $m = 2Nh$, ТВЛ.

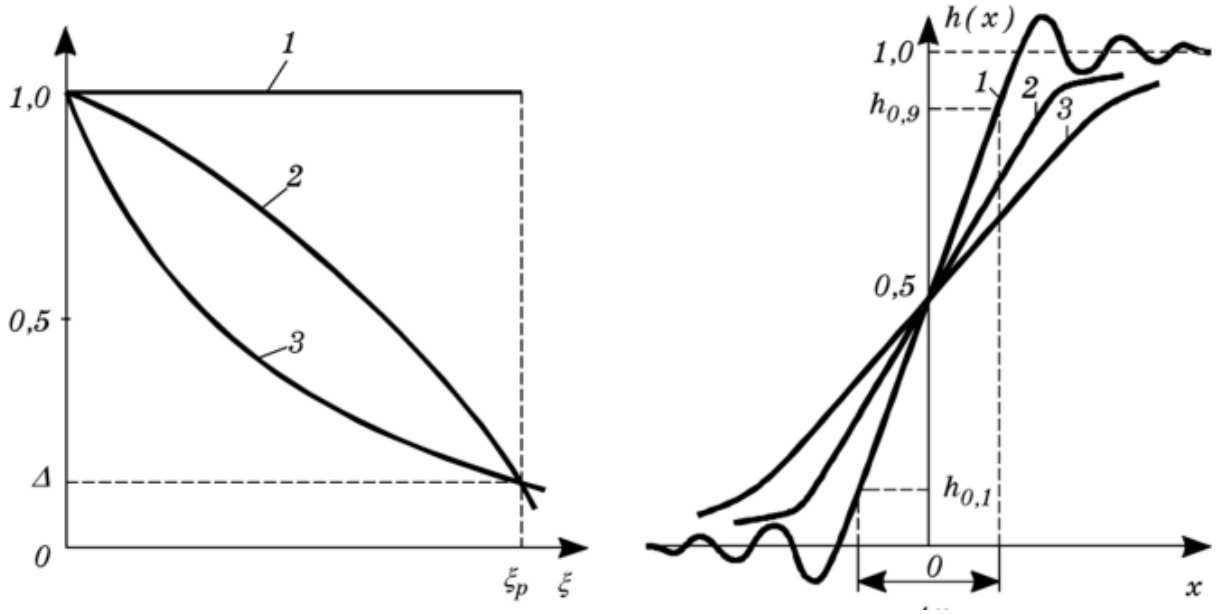
Таким чином, телевізійна лінія (ТВЛ) – це одиниця вимірювання просторової частоти синусоїдальної або штрихової світи, або іншої періодичної структури зображення, що дорівнює відношенню його висоти до половини періоду.

Існує також поняття відносної просторової частоти, під якою розуміється відношення $\xi = m / 2Z$. Тоді $\omega = \pi m / Z = 2\pi\xi$. У разі $m = Z$ маємо $\xi = 0{,}5$ і $\omega = \pi$.

Зазначимо, що вимірювання просторових частот зображення в телевізійних лініях, що відносяться не до одиниці довжини, а до висоті растру на фотоперетворювачі або кінескопі, пов'язане з характером телевізійного зображення, яке на відміну від оптичного завжди має дискретну структуру з фіксованим числом елементів, не залежним від способу формування та розмірів зображення.

На рис. 1.4 а, б представлені нормовані, тобто наведені до одиниці при ξ=0 просторово-частотні і відповідні їм перехідні характеристики телевізійної системи. Функція 1 побудована для випадку, коли системи ПЧХ має П-подібну форму з різко обмеженою смугою частот.

На відповідній перехідній характеристиці спостерігаються викиди, які мають за відсутності фазових спотворень симетричний характер. Наявність цих викидів призводить до появи на зображенні повторних контурів меж великих деталей об'єкта. З порівняння кривих 2 і 3 видно, що максимальна крутість перехідної характеристики, що має місце при X = 0, залежить від площі, що обмежується ПЧХ.



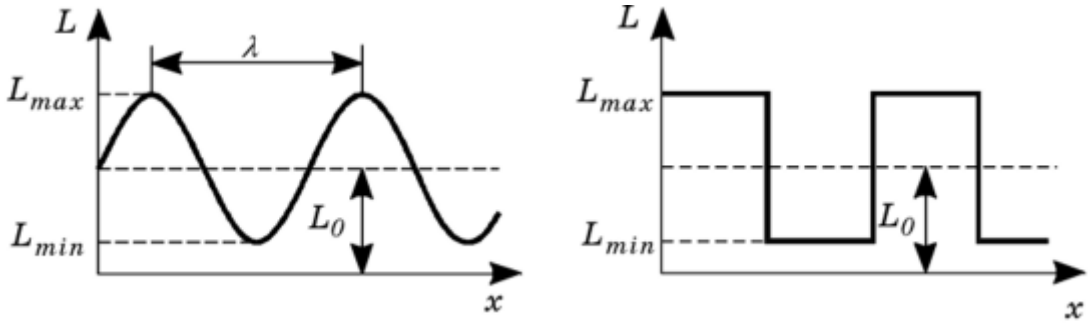
а) б)

Рисунок 1.4 – Просторово-частотні (а) та перехідні (б) характеристики телевізійної системи [10]

За перехідною характеристикою визначають різкість меж відтворюваного зображення як різницю $\Delta x = x_{0,9} - x_{0,1}$ між точками, що відповідають 0,9 та 0,1 $h(x)$ (рис. 1.4).

При знаходженні ПЧХ системи слід пам'ятати, що вона є добутком ПЧХ окремих ланок: об'єктиву, фотоперетворювача, відеотракту та екрану.

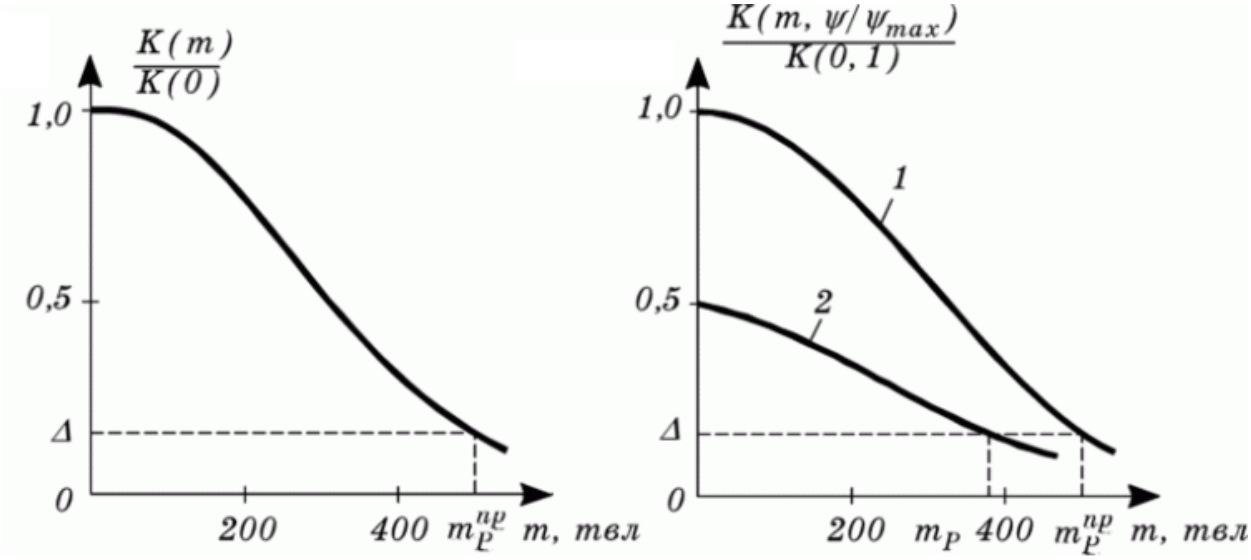
Зазначимо, що як ПЧХ, так і ЧКХ можуть безпосередньо виражатися через число напівперіодів або ліній відповідно.



а) б)

Рисунок 1.5 – Синусоїдальні (а) та прямокутні (б) розподілу яскравості в оптичній мірі [10]

На рис. 1.6 а, б показані ЧКХ систем, на яких по осі ординат відкладено відношення $K(m)/K(0)$, де за визначенням $K(m) \equiv L_m(m)$ – амплітуда яскравості m-го компонента штрихової міри; $K(0) \equiv L_0(m)$ – відповідно до нульового компонента (велика деталь зображення).



а) б)

Рисунок 1.6 – Частотно-контрастні характеристики телевізійної системи:
а – стандартна; б – при різних відношеннях сигнал/шум [10]

Крім поняття ЧКХ, прийнято також користуватися поняттям частотної залежності коефіцієнта модуляції $M(m)/M(0)$, під яким розуміється відношення амплітуди яскравості $L_m = (L_{\max} - L_{\min}/2)$ до постійної складової L_0 (рис. 1.5). Неважко показати, що для будь-якої частотної компоненти [12]

$$M(m) = L_m / L_0 = (L_{\max} - L_{\min}) / 2L_0 = (L_{\max} - L_{\min})/(L_{\max} - L_{\min}). \quad (1.20)$$

Для нульової компоненти $M(0) = L_m(0)/L_0$, причому за умови $L_{\min}$ =0 маємо $M(0) = 1$. Залежність $M(m)$ зветься функцією передачі модуля цілі (ФПМ). З наведених міркувань випливає, що [12]

$$K(m)/K(0) = M(m)/M(0) = L_m(m)/L_m(0). \qquad (1.21)$$

Тобто поняття ЧКХ та ФПМ є ідентичними.

При стандартних вимірюваннях ЧКХ залежність $K(m)$ зазвичай знімається по гранично контрастним оптичним мірам і за досить великих освітленостей фотоперетворювача, які забезпечують максимальне відношення сигнал/шум на виході відеотракту ψ_{max} від великих деталей зображення (рис.1.6, а).

При знижених значеннях ψ ЧКХ змінюють своє розташування. У цьому випадку сімейство нормованих ЧКХ може бути представлене у вигляді, зображеному на рис. 1.6, б. На цьому рисунку значення $K(0,1)$ відповідає амплітуді сигналів на виході відеотракту великих деталей зображення при $\psi = \psi_{max}$, а крива 1 являє собою стандартну ЧКХ. Крива 2 побудована для випадку $\psi = 0,5 \cdot \psi_{max}$.

1.4 Енергетична та контрастна чутливості телевізійної системи

Системи прикладного призначення часто доводиться експлуатувати у складних умовах спостереження, яким властиві обмежені контрасти та енергії вхідних зображень. У таких випадках особливо важливого значення набуває енергетична та контрастна чутливість системи [13].

Визначимо енергетичну чутливість як величину, обернену мінімальної вхідної енергії Wex_{min}, а контрастну чутливість — як величину, обернену до мінімального контрасту вхідного зображення $Квх_{min}$, при яких система забезпечує виконання своїх функцій. До таких функцій для систем спостереження відносяться виявлення та розпізнавання об'єкта із заданою ймовірністю, а для вимірювальних систем – вимірювання того чи іншого параметра об'єкта з необхідною точністю.

Дане визначення фізично пов'язує між собою енергетичну $e_C = 1/W_{вх\min}$ та контрастну $\varepsilon_C = 1/K_{вх\min}$ чутливості системи, що є виправданим з погляду системного підходу до вирішення зазначених вище завдань та зумовлює у широких межах можливість проведення між обома величинами обмінних операцій. Подібний обмін може здійснюватися, наприклад, шляхом зміни значення коефіцієнта підсилення відеотракту.

Для прямого контрасту [13]

$$W_{вх\min} = W_{ф\min}, \quad K_{вх\min} = \frac{W_ф - W_o}{W_ф}, \tag{1.22}$$

де $W_ф, W_o$ – енергія на вході фотоперетворювача від фону та об'єкта відповідно.

Оскільки телевізійна система за своєю природою є багатоелементною, то енергію зазвичай відносять до одного елементу, площа якого дорівнює S_e. Тоді для прямого контрасту [13]

$$e_C = \frac{1}{E_{ф\min} \cdot T_н \cdot S_e}, \quad \varepsilon_C = \frac{E_ф}{E_ф - E_o}, \tag{1.23}$$

де $E_ф, E_o$ – освітленість фотоперетворювача від фону та об'єкту;

$T_н$ – час накопичення енергії (для систем без накопичення енергії $T_н$ – час передачі одного елемента).

Якщо освітленість за час $T_н$ не залишається постійною, то отримаємо такі співвідношення [14]:

$$e_C = \frac{1}{H_{ф\min} \cdot S_e}, \quad \varepsilon_C = \frac{H_ф}{H_ф - H_o}, \tag{1.24}$$

де $H = \int_0^{T_н} E(t)dt$ – експозиція, яку отримує фотоперетворювач за час $T_н$.

Насправді часто користуються поняттям енергетичної, чи світлової, чутливості системи, датчика чи фотоперетворювача як величиною, зворотної мінімальній освітленості. Обмеженість використання цього критерію, особливо в порівнянні систем з різними площами елемента S_e або часом накопичення $T_н$, очевидна.

1.5 Висновки по розділу 1

В результаті аналізу характеристик та параметрів телевізійних систем встановлено, що важливішими параметрами для вирішення задач виявлення, розрізнення і впізнавання є чутливість системи і просторово-частотна характеристика.

Розрізнюють енергетичну чутливість і контрастно чутливість. Два параметри пов’язані між собою, але більш інформативним є параметр контрастної чутливості. Він показує мінімальний контраст об’єкту з фоном, який може виявити система.

Просторово-частотна характеристика (ПЧХ) системи показує здатність ТВ системи до передачі амплітуд сигналів від об’єктів різного розміру, з яких складається вихідне зображення. В умовах шуму або в умовах неприродного ІЧ освітлення ПЧХ може змінювати свій вигляд, внаслідок чого просторове розрізнення системи може знижуватися.

Метою кваліфікаційної роботи є проведення числових оцінок характеристик системи виявлення малих БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні і формулювання вимог до її технічних параметрів.

Ближній інфрачервоний канал можна розглядати як один з каналів у комплексній системі виявлення, розпізнавання, ідентифікації і пеленгації

БПЛА. В комплексній системі [15] використовують радіолокаційні [16], радіочастотні [17], акустичні [18-21] і оптико-електронні [22-26] методи.

На кафедрі Медіаінженерії і інформаціонних радіоелектронних систем ХНУРЕ виконуються дослідження в рамках НДР №335 “Методи і засоби виявлення безпілотних літальних апаратів системи захисту військових і критично важливих об’єктів інфраструктури”. Тематика даної атестаційної роботи відповідає і доповнює дослідження в рамках НДР №335.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА В БЛИЖНЬОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

2.1 Енергетичний розрахунок системи з інфрачервоним підсвічуванням об'єкта

Інфрачервоне підсвічування об'єкта є невід'ємною частиною телевізійних систем прихованого спостереження та систем безпеки, що працюють в активному режимі. В якості підсвічувальних пристроїв застосовуються потужні світлодіоди і світлодіодні зборки, що випромінюють енергію в спектральному діапазоні хвиль 0,80…0,85 мкм, що зручно при використанні в системі матричних ПЗЗ [28]. Об'єктом спостереження в нашому випадку служить малий або середній БПЛА, який не має власного випромінення в цьому діапазоні.

Завданням розглянутої системи є виявлення і розпізнавання БПЛА, що з'являється в зоні спостереження або охорони. Слід зазначити, що процес розпізнавання може бути утруднений через знижену роздільну здатність системи, що обумовлено гіршою, ніж при природному освітленні, частотно контрастною характеристикою (ЧКХ) матричного ПЗЗ [29].

Енергетичний розрахунок системи з інфрачервоним підсвічуванням базується, як і для оптичного діапазону, на визначеній попередньо енергетичній чутливості системи, що виражається у світлотехнічній системі одиниць.

На рис. 2.1 наведена проста схема освітлювача у вигляді однолінзового конденсора, що забезпечує паралельність променів, що виходять, якщо джерело випромінювання помістити в передньому фокусі конденсора f'. В силу скінченності майданчика випромінювача S' у схемі має місце деяка розбіжність пучка променів і, як наслідок, зміна опроміненості об'єкта площею S при зміні відстані до нього l, причому $l >> f'$.

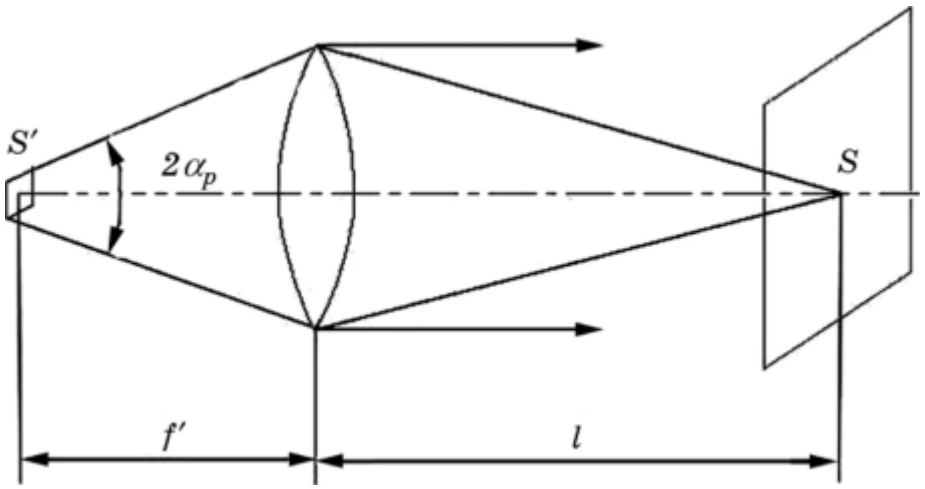


Рисунок 2.1 – Схема однолінзового освітлювача

Для усунення цього недоліку слід застосувати складнішу, але і більш громіздку схему освітлювача [30].

Можна запропонувати такий порядок енергетичного розрахунку такої ТВ-системи [31].

Визначають необхідну опроміненість об'єкта:

$$E_e = \frac{E \cdot k_a}{683 \cdot k_o \cdot k_p}, \tag{2.1}$$

де E – освітленість об'єкта, лк;

k_o – коефіцієнт корисної дії ока для еталонного джерела типу А, $k_o = 2{,}43 \cdot 10^{-2}$;

k_p і k_a – коефіцієнти використання променистого потоку світлодіодом та джерелом А відповідно.

Внаслідок розрахунків, проведених методом графічного інтегрування, отримаємо: k_a=0,15 і k_p=0,9 (для довжини хвилі λ= 0,8 мкм). З урахуванням цих співвідношень $E_e = 10^{-2} \cdot E$, Вт/м^2.

Орієнтовно вибирають світлодіод з потужністю випромінювання $P_{вип}$ і відповідно випромінюваним потоком Φ_e.

Визначають тілесний кут випромінювання

$$\omega = 2\pi(1-\cos\alpha_p), \tag{2.2}$$

де α_p – половина кута охоплення (рис. 2.1).

Визначають яскравість випромінюючого майданчика світлодіода S'

$$L_e = \frac{\Phi_e}{\omega S'}, \text{ Вт/(ср·м}^2\text{)}, \tag{2.3}$$

де $S' = \pi d^2/4$ (d – діаметр майданчика).

Знаходять площу вихідної зіниці конденсора

$$A_{вих} = \frac{E_e l^2}{\tau_o L_e}, \tag{2.4}$$

де τ_o – інтегральне значення коефіцієнта пропускання оптичної системи.

Звідси діаметр вихідної зіниці

$$D = 2\sqrt{\frac{A_{вих}}{\pi}}. \tag{2.5}$$

7. Визначають фокусну відстань конденсора, вважаючи, що площа S' знаходиться у фокусі, а весь потік перехоплюється конденсором

$$f' = \frac{D}{2 \cdot tg\alpha_p}. \tag{2.6}$$

Визначають збільшення та відносний отвір конденсора відповідно:

$$V = \frac{l}{f'}, \quad O = \frac{D}{f'}. \tag{2.7}$$

Знаходять площу опромінюваної поверхні

$$S = S'V^2. \tag{2.8}$$

Порівняння площі S з вимогою технічного завдання дозволяє зробити висновок оптимальності обраного світлодіода.

Розглянемо конкретний приклад. Проведемо енергетичний розрахунок системи виявлення малого БПЛА ІЧ-підсвічуванням за таких умов:

– необхідна освітленість об'єкта спостереження E=2 лк,

– відстань від БПЛА до джерела підсвічування l =100 м,

– площа області спостереження S = 30 м х 40 м = 1200 м^2.

Визначаємо необхідну опроміненість об'єкта спостереження (2.2)

$$E_e = 0{,}01 \cdot E = 0{,}01 \cdot 2 = 0{,}02 \text{ Вт/м}^2.$$

Вибираємо світлодіодну збірку типу IPC-3-800, що складається з 12 кристалів, зібраних на спеціальній кремнієвій підкладці з ізолюючим шаром. Параметри збірки IPC-3-800:

– довжина хвилі 0,8 мкм,

– потужність випромінювання 300 мВт,

– кут охоплення 40°,

– діаметр випромінюючого майданчика 20 мм.

Тілесний кут випромінювання

$$\omega = 2\pi(1 - \cos\alpha_p) = 2\pi(1 - \cos 20°) = 0{,}38 \text{ ср},$$

де $\alpha_p = 40° / 2 = 20°$.

Яскравість майданчика випромінювання

$$L_e = \frac{\Phi_e}{\omega S'} = \frac{300 \cdot 10^{-3}}{0{,}38 \cdot 314 \cdot 10^{-6}} = 2514 \text{ , Вт/(ср·м}^2\text{)},$$

де $S' = \pi d^2/4 = 3{,}14 \cdot (20 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 314 \cdot 10^{-6}$ м^2.

Площа вихідної зіниці конденсора

$$A_{вих} = \frac{E_e l^2}{\tau_o L_e} = \frac{0{,}02 \cdot 100^2}{0{,}9 \cdot 2514} = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

де прийняте значення τ_o=0,9.

Діаметр вихідної зіниці

$$D = 2\sqrt{\frac{A_{вих}}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{45 \cdot 10^{-3}}{3{,}14}} = 0{,}24 \text{ м.}$$

Фокусна відстань конденсора

$$f' = \frac{D}{2 \cdot tg\alpha_p} = \frac{0{,}24}{2 \cdot tg\,20°} = 0{,}33 \text{ м.}$$

Збільшення та відносний отвір конденсора відповідно:

$$V = \frac{l}{f'} = \frac{100}{0{,}33} = 303, \quad O = \frac{D}{f'} = \frac{0{,}24}{0{,}33} = 0{,}73. \qquad (2.7)$$

Площа опромінюваної поверхні

$$S = 314 \cdot 10^{-6} \cdot 303^2 = 28 \text{ м}^2. \quad (2.8)$$

З отриманих результатів стає очевидним, що класичний підхід до розрахунку системи спостереження з інфрачервоною підсвіткою дає незадовільний результат. По-перше, система фокусування інфрачервоних променів за розрахунками виходить надто громіздкою. По-друге, площа освітлення занадто менша за потрібну. Виходом із ситуації вбачається матрицювання декількох освітлювальних приладів в єдину систему.

2.2 Енергетичний розрахунок матричної системи інфрачервоного підсвічування об'єкта

Вважатимемо, що результуючу освітленість на об’єкті ми отримаємо за рахунок не одного, а n інфрачервоних випромінювачів. Тобто можна вважати що сумарна освітленість

$$E = nE_1, \quad (2.9)$$

а сумарна площа освітлення

$$S = nS_1, \quad (2.10)$$

де індекс «1» означає параметри освітлення одиничним випромінювачем.

Кількість випромінювачів n у сучасних прожекторах може досягати декількох сотень. Тому використання прожекторів з матричним розташуванням випромінювачів є більш доцільним з усіх точок зору:

– зменшення габаритів і загальних технічних вимог до системи фокусування (конденсора), що виходить з виразу (2.10);

– збільшення освітленості на об’єкті за рахунок можливості вибору прожектора з більшою кількістю випромінювачів, що виходить з виразу (2.9).

Проведемо енергетичні оцінки системи для такого варіанта.

Припустимо, що маємо матричний прожектор зі світловою потужністю випромінення Φ_e та кутом випромінення $2\alpha_p$ (рис.2.2).

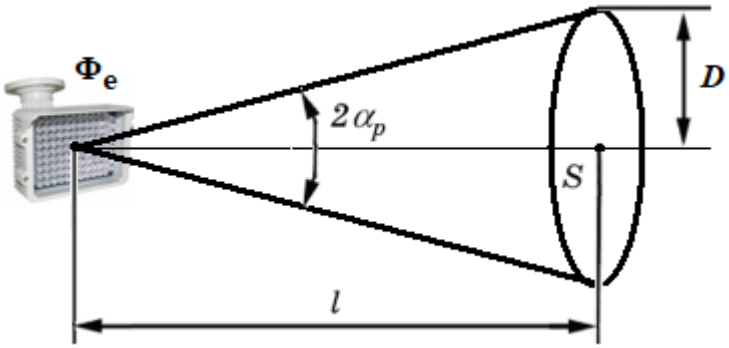


Рисунок 2.2 – Схема з матричним освітлювачем

На відстані l ефективна площина S плями опромінення діаметром D складе

$$S = \frac{\pi D^2}{4}. \tag{2.11}$$

З геометрії, показаної на рис.2.2, слідує

$$D = 2l \cdot arctg\alpha_p. \tag{2.12}$$

Підставляючи (2.12) в (2.11), отримаємо

$$S = \frac{4\pi \cdot l \cdot arctg^2\alpha_p}{4} = \pi \cdot l \cdot arctg^2\alpha_p. \tag{2.13}$$

Враховуючи, що освітленість E, енергетична опроміненість E_e і світлова потужність випромінення Φ_e пов'язані виразами

$$E \approx 100E_e, \quad E_e = \frac{\Phi_e}{S}, \tag{2.14}$$

отримаємо формули для освітленості

$$E = \frac{100 \cdot \Phi_e}{\pi l^2 \cdot arctg^2 \alpha_p} \approx \frac{32 \cdot \Phi_e}{l^2 \cdot arctg^2 \alpha_p}, \quad (2.15)$$

для потрібної світлової потужності випромінення

$$\Phi_e = 0{,}03 \cdot El^2 \cdot arctg^2 \alpha_p, \quad (2.16)$$

та для дальності дії інфрачервоної системи освітлення

$$l = 5{,}65 \cdot \sqrt{\frac{\Phi_e}{E}} \cdot arctg\alpha_p. \quad (2.17)$$

Тобто, в даній роботі виведені інженерні формули (2.15) – (2.17) для розрахунку енергетичних параметрів системи освітлення інфрачервоної системи виявлення БПЛА.

Найбільш поширені матричні інфрачервоні LED прожектори з кутами випромінення 30°, 45° та 60°.

На рис. 2.3 показана залежність освітленості на об'єкті спостереження від відстані для трьох значень світлової потужності випромінювання: Φ_e=50, 100, 200 Вт при куті випромінення $2\alpha_p$=45° .

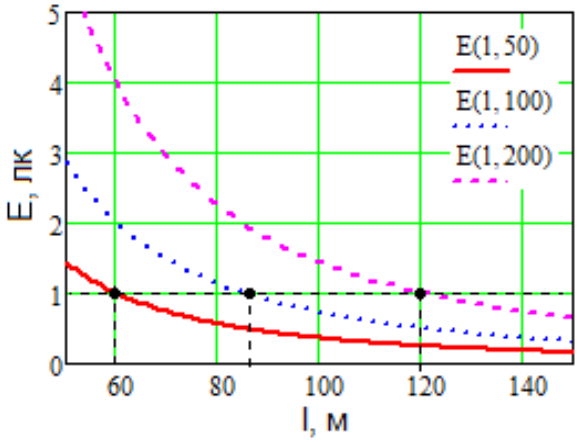


Рисунок 2.3 – Залежність освітленості на об'єкті від відстані для світлової потужності випромінювання: Φ_e=50, 100, 200 Вт при $2\alpha_p$=45

На рис. 2.4 показана залежність потрібної світлової потужності випромінення від відстані для трьох значень чутливості камери спостереження: E =0.3, 1, 10 лк при куті випромінення $2\alpha_p$ =45° .

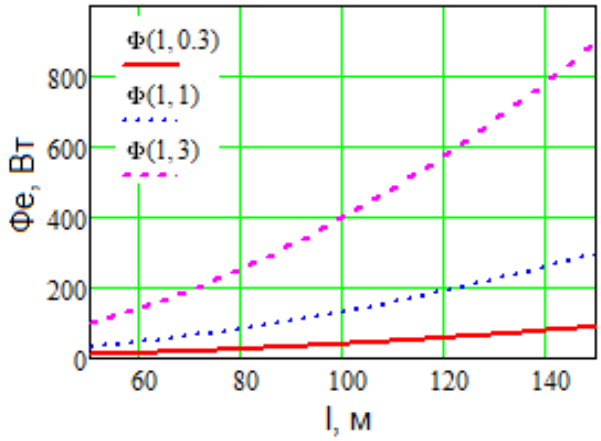


Рисунок 2.4 – Залежність потрібної світлової потужності випромінення від відстані для чутливості камери: E =0.3, 1, 10 лк при $2\alpha_p$ =45°

У виразі (2.17) відношення Φ_e / E являє собою енергетичний потенціал системи і має розмірність [Вт/лк]. Тобто того ж самого результату можна досягти як за рахунок збільшення потужності випромінення, так і за рахунок збільшення чутливості камери.

На рис.2.5 показані залежність дальності дії інфрачервоної системи освітлення від енергетичного потенціалу системи Φ_e / E для кутів випромінення прожектора $2\alpha_p$ = 30°, 45° та 60°.

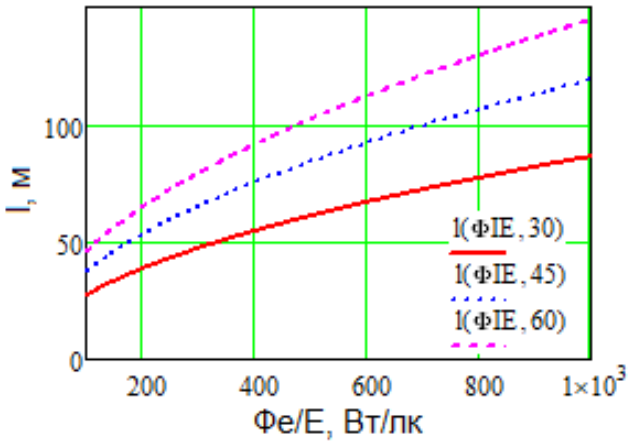


Рисунок 2.5 – Залежність дальності дії системи від енергетичного потенціалу системи Φ_e / E для кутів випромінення прожектора $2\alpha_p$ = 30°, 45° та 60°

Аналіз отриманих графіків показує, що великий потенціал для підвищення ефективності системи виявлення малих БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні полягає в покращенні чутливості камери відеоспостереження. Чутливість сучасних камер може складати 1 лк і менше. В той же час, сучасні інфрачервоні прожектори можуть мати світлову потужність випромінення більше 100 Вт. Поєднання цих двох показників системи може дати дальність дії системи більше 100 м. Для уточнення висновків проведемо розрахунок чутливості камер в ближньому інфрачервоному діапазоні.

2.3 Розрахунок чутливості камери в ближньому інфрачервоному діапазоні

Оцінимо чутливість камери в інфрачервоному діапазоні. Границею чутливості будемо вважати відношення сигнал-шум 20 дБ.

Корисний сигнал визначається кількістю електронів $N_ф$, які накопичує піксель за час експонування матриці в кадрі [32,33]

$$N_ф = \frac{E_e \cdot S \cdot T_e}{\overline{W}_ф} \cdot \eta, \qquad (2.15)$$

де E – енергетична опроміненість, Вт/м^2;

S – площа одного пікселя, м^2;

T_e – час експонування матриці, с;

$\overline{W}_ф = h\overline{\nu}$ – середня енергія фотона, Дж;

$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка;

$\overline{\nu}$ – середня частота випромінення прожектора, Гц;

η – квантовий вихід.

З формули (2.15) енергетична опроміненість матриці [32, 33]:

$$E_e = \frac{N_ф \cdot \overline{W}_ф}{S \cdot T_e \cdot \eta} \cdot \tag{2.16}$$

Для оцінки середньоквадратичного рівня шумів ПЗЗ або КМОП матриці скористуємося формулою [32, 33]

$$N_ш \approx \sqrt{2N_ф} \, . \tag{2.17}$$

Коефіцієнт «2» у виразі (2.17) враховує той факт, що тепловий і фотонний шум матриці без охолодження майже однакові.

В такому випадку відношення сигнал-шум

$$\frac{N_ф}{N_ш} = \frac{N_ф}{\sqrt{2N_ф}} = 10^{SNR/20}, \tag{2.18}$$

де *SNR* – пороговий рівень сигнал-шум, дБ.

З формули (2.18)

$$N_ф = 2 \cdot 10^{SNR/10} . \tag{2.19}$$

Підставляючи (2.19) в формулу (2.16), запишемо

$$E_e = \frac{2 \cdot 10^{SNR/10} \cdot \overline{W}_ф}{S \cdot T_e \cdot \eta} \cdot , \tag{2.20}$$

Середня енергія фотонів на довжині хвилі $\overline{\lambda}$

$$\overline{W_{\phi}} = h\overline{\nu} = h\frac{c}{\overline{\lambda}}, \tag{2.21}$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість поширення світла;

$\overline{\lambda}$=800 нм – середня довжина хвилі інфрачервоного прожектора.

Тоді з урахуванням, що постійна $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, формулу (2.21) запишемо як

$$\overline{W_{\phi}} = h\frac{c}{\overline{\lambda}} = 6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \frac{3 \cdot 10^8}{800 \cdot 10^{-9}} = 2{,}48 \cdot 10^{-19}\ \text{Дж}. \tag{2.22}$$

Підставляючи (2.22) у вираз (2.20), запишемо

$$E_e = \frac{5 \cdot 10^{0{,}1 \cdot SNR - 19}}{S \cdot T_e \cdot \eta},\ [\text{Вт/м}^2]. \tag{2.23}$$

Формула (2.23) дає значення енергетичної опроміненості на матриці, потрібної для отримання заданого відношення сигнал-шум *SNR*. З урахуванням, що освітленість $E[лк]$ пов'язана з енергетичною опроміненістю в ближньому інфрачервоному діапазоні $E_e[Вт/м^2]$ як

$$E_e = 10^{-2} \cdot E,\ \text{Вт/м}^2, \tag{2.24}$$

виразу (2.23) відповідатиме освітленість:

$$E = \frac{5 \cdot 10^{0{,}1 \cdot SNR - 17}}{S \cdot T_e \cdot \eta},\ [\text{лк}]. \tag{2.25}$$

або враховуючи $S_1 = d^2$, де d – розмір одного пікселя:

$$E = \frac{5 \cdot 10^{0,1 \cdot SNR - 17}}{d^2 \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [лк]}. \quad (2.26)$$

В розрахунках і при вимірюванні чутливості камер нормують освітленість на об’єкті E_o. В площині світлочутливої матриці камери освітленість буде менше в порівнянні з E_o, вона розраховується за формулою

$$E = \frac{E_0 \cdot \rho \cdot \tau}{4 \cdot F^2}, \text{ [лк]}, \quad (2.27)$$

де E_0 – освітленість на об'єкті (БПЛА), лк;

ρ – коефіцієнт світловідбиття дрону;

τ – коефіцієнт інтегрального світлопропускання об'єктива;

F – діафрагмове число об'єктива.

З формули (2.27)

$$E_0 = \frac{4 \cdot F^2 \cdot E}{\rho \cdot \tau}, \text{ [лк]}. \quad (2.28)$$

Підставляючи (2.26) в (2.28), отримаємо:

$$E_o = \frac{2 \cdot F^2 \cdot 10^{0,1 \cdot SNR - 16}}{\rho \cdot \tau \cdot d^2 \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [лк]}. \quad (2.29)$$

Розглянемо випадок, коли відеоспостереження ведеться на камеру з роздільною здатністю $N_г \cdot N_в$= 1920 х 1080 пікселів і діагональним розміром матриці $d_м = 1/2''$ (максимальний розмір для поширених ІЧ камер).

Співвідношення сторін a, b і діагоналі матриці $d_м$ при форматі 16:9

$$a : b : d_м = 9 : 16 : \sqrt{16^2 + 9^2} \text{ або } a : b : d_м = 9 : 16 : 18{,}37. \qquad (2.30)$$

Звідси горизонтальна сторона

$$b = \frac{16}{18{,}37} d_м = 0{,}87 \cdot 0{,}5 \cdot 2{,}54 \cdot 10^{-2} = 1{,}11 \cdot 10^{-2} \text{ м.} \qquad (2.31)$$

Тоді розмір пікселя

$$d = \frac{b}{N_г} = \frac{1{,}11 \cdot 10^{-2}}{1920} = 5{,}8 \text{ мкм.} \qquad (2.32)$$

При пороговому значенні *SNR*=30 дБ, $d = 5{,}8$ мкм, $F = 1{,}4$, $\rho = 0{,}75$, $\tau = 0{,}85$, $T_е = 1/30$ с, $\eta = 0{,}8$ розрахункове значення

$$E_о = \frac{2 \cdot 1{,}4^2 \cdot 10^{0{,}1 \cdot 30 - 4}}{0{,}75 \cdot 0{,}85 \cdot 5{,}8^2 \cdot (1/30) \cdot 0{,}8} = 0{,}68 \text{. [лк].} \qquad (2.33)$$

При пороговому значенні *SNR*=20 дБ (стандарт для камер відеоспостереження) розрахунок по формулі (2.13) дає значення $E_о = 0{,}07$ лк.

В цілому, отримані значення відповідають чутливостям сучасних поширених IP відеокамер. Розрахунки потрібної освітленості зведені в

табл.2.1 для різної роздільної здатності камери (4k, Full HD, HD), і різного відношення сигнал-шум (20 дБ, 30 дБ, 40 дБ).

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку потрібної освітленості на об’єкті спостереження при $d_м = 1/2"$

SNR, дБ	20			30			40		
Режим	4k	FullHD	HD	4k	FullHD	HD	4k	FullHD	HD
d, мкм	2,9	5,8	8,7	2,9	5,8	8,7	2,9	5,8	8,7
E_o, лк	0,274	0,07	0,03	2,74	0,68	0,305	27,4	6,8	3,05

Найбільш надійні режими для виявлення дронів є 4k і FullHD при відношеннях сигнал шум 30…40 дБ. З табл. 2.1 випливає, що для цих режимів необхідно забезпечити освітленість на об’єкті більше 3 лк при $d_м = 1/2"$. При менших розмірах матриці потребується більша освітленість.

Проведемо оцінку впливу різних факторів на відношення сигнал-шум. По-перше, виразимо *SNR* з виразу (2.29):

$$SNR = 10\lg\left(\frac{E_o \cdot \rho \cdot \tau \cdot d^2 \cdot T_e \cdot \eta}{2 \cdot F^2}\right) + 160, \qquad (2.34)$$

чи якщо підставляти значення d в мкм

$$SNR = 10\lg\left(\frac{E_o \cdot \rho \cdot \tau \cdot d_{мкм}^2 \cdot T_e \cdot \eta}{2 \cdot F^2}\right) + 40. \qquad (2.35)$$

На рис.2.6 показані графіки відношення сигнал-шум *SNR* у відеозображенні в залежності від освітленості на об’єкті спостереження E_o

для трьох роздільних здатностей відео 4k, FullHD, HD при частоті кадрів 30 к/с (T_e =1/30 с.).

Аналіз графіків на рис.2.6 показує, що в режимі 4k відношення сигнал-шум *SNR*=30 дБ досяжне при освітленості на об'єкті не менше 2,5 лк, а значення *SNR*=35 дБ – при освітленості 8,5 лк.

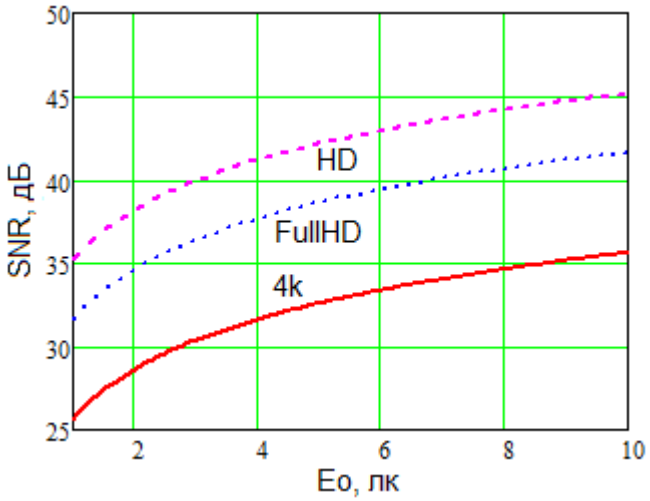


Рисунок 2.6 – Відношення сигнал-шум в залежності від освітленості в режимах 4k, FullHD, HD при 30 к/с

При цьому треба розуміти, що шуми такого рівня досить помітні на зображенні. Збільшити освітленість на об'єкті досить важко на практиці внаслідок потреби застосування надто потужних ІЧ прожекторів. Тому при моделюванні роботи подобного роду систем виявлення БПЛА з використанням нейронних мереж слід орієнтуватися на зображення з *SNR*=30…35 дБ.

Відношення *SNR*=35 дБ досяжне в режимі FullHD при E_o=2 лк, а в режимі HD при E_o=1 лк.

Можна зазначити, що процес виявлення і розпізнавання БПЛА може бути утруднений через зниження роздільної здатності системи, що обумовлено погіршенням, в порівнянні з природним освітленням, частотно-контрастної характеристики (ЧКХ) матричного перетворювача.

Якщо зафіксувати значення *SNR*, можна отримати залежність потрібної освітленості в залежності від роздільної здатності системи $N_г$ в ТВЛ. З виразів (2.31) та (2.32) слідує

$$d = 0{,}87 \cdot d_м / N_г = 0{,}87 \cdot 2{,}54 \cdot 10^{-2} \cdot d''_м / N_г = 2{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot d''_м / N_г . \quad (2.36)$$

Підставляючи (2.36) в (2.29), отримаємо

$$E_o = \frac{0{,}45 \cdot N_г \cdot F^2 \cdot 10^{0{,}1 \cdot SNR - 12}}{\rho \cdot \tau \cdot d''^{\,2}_м \cdot T_e \cdot \eta}, \text{ [лк]}. \quad (2.37)$$

На рис.2.7 показана залежність потрібної освітленості на об’єкті E_o від роздільної здатності системи $N_г$ для трьох різних діагональних розмірів матриці – 1/2", 1/3”, 1/4".

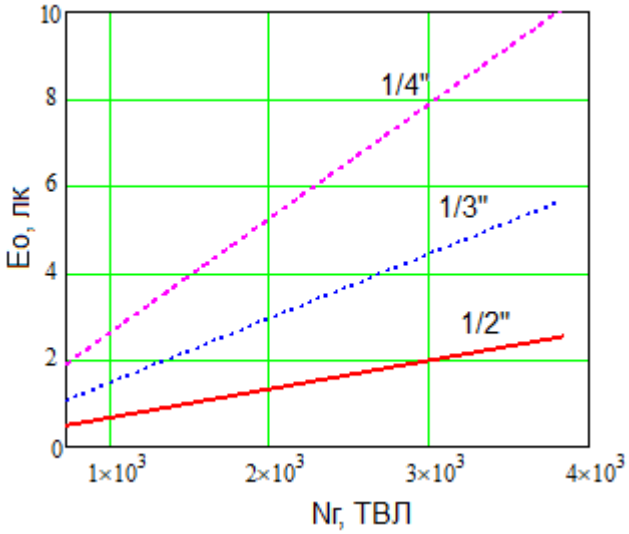


Рисунок 2.7 – Залежність потрібної освітленості на об’єкті E_o від роздільної здатності системи $N_г$ для розмірів матриці – 1/2", 1/3”, 1/4"

З рис 2.7 наочно видно, що задля отримання великої чутливості системи при збереженні високої роздільної здатності і відношення сигнал-шум потрібно використовувати камери з якнайбільшим розміром матриці.

Крім того, на результат виявлення буде впливати сама роздільна здатність системи. Проведемо оцінку її впливу у розділі 3.

2.4 Висновки по розділу 2

В результаті теоретичних оцінок характеристик системи виявлення БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні вияснено наступне. Для підсвічування цілі недоцільно застосовувати класичний підхід з використанням галогенової лампи з інфрачервоним світлофільтром. Це потребує використання однолінзового конденсора великого розміру, з великою вихідною зіницею і фокусною відстанню. Крім того, щоби забезпечити освітленість декілька лк на відстані близько 100 м потрібна електрична потужність лампи порядка кВт.

Більш ефективним є використання матричних LED прожекторів. Це дає зменшення габаритів і загальних технічних вимог до системи фокусування; збільшення освітленості на об’єкті за рахунок можливості вибору прожектора з більшою кількістю випромінювачів.

Проведено енергетичні оцінки системи відеоспостереження в ближньому ІЧ діапазоні. Виведені інженерні формули для розрахунку енергетичних параметрів системи освітлення: залежність освітленості на об’єкті спостереження від відстані для певного значення світлової потужності випромінювання; залежність потрібної світлової потужності від дальності дії заданої чутливості камери спостереження; залежність дальності дії інфрачервоної системи освітлення від енергетичного потенціалу системи.

Аналіз отриманих графіків показав, що великий потенціал для підвищення ефективності системи виявлення малих БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні полягає в покращенні чутливості камери відеоспостереження. Чутливість сучасних камер може складати 1 лк і менше. В той же час, сучасні інфрачервоні прожектори можуть мати світлову

потужність випромінення більше 100 Вт. Поєднання цих двох показників системи може дати дальність дії системи більше 100 м.

Для уточнення висновків проведено розрахунок чутливості камер в ближньому інфрачервоному діапазоні. Отримані графіки відношення сигнал-шум у відеозображенні в залежності від освітленості на об’єкті спостереження для роздільних здатностей відео 4k, FullHD, HD. Аналіз показав, що в режимі 4k відношення сигнал-шум 30 дБ досяжне при освітленості на об’єкті не менше 2,5 лк, а 35 дБ – при освітленості 8,5 лк. При цьому треба розуміти, що шуми такого рівня досить помітні на зображенні. Збільшити освітленість на об’єкті досить важко на практиці внаслідок потреби застосування надто потужних ІЧ прожекторів. Тому при моделюванні роботи подобного роду систем виявлення БПЛА з використанням нейронних мереж слід орієнтуватися на зображення з *SNR*=30…35 дБ.

Процес виявлення і розпізнавання БПЛА може бути утруднений через зниження роздільної здатності, що обумовлено погіршенням, в порівнянні з природним освітленням, частотно-контрастної характеристики системи.

Отримана залежність потрібної освітленості на об’єкті від роздільної здатності системи для різних діагональних розмірів матриці. Задля отримання великої чутливості системи при збереженні високих роздільної здатності і відношення сигнал-шум потрібно використовувати камери з якнайбільшим розміром матриці. Серед доступних IP камер найбільший розмір 1/2".

3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА В БЛИЖНЬОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ

3.1 Постановка задачі

Експериментальне дослідження будь-якої відеосистеми виявлення об’єктів передбачає використання нейтронної мережі, для навчання якої потрібно мати декілька сотень зображень об’єктів пошуку в різних ракурсах, з різною роздільною здатністю, різним відношенням сигнал-шум.

В наш воєнний час формування такої навчальної бази зображень є затрудненим внаслідок обмежень на польоти БПЛА і заборону на фото- і відеозйомку. Тому задачею даного розділу є обґрунтування експерименту з отримання потрібної навчальної бази шляхом моделювання і обробки зображень.

Пропонується наступний алгоритм отримання навчальної бази зображень (рис.3.1).

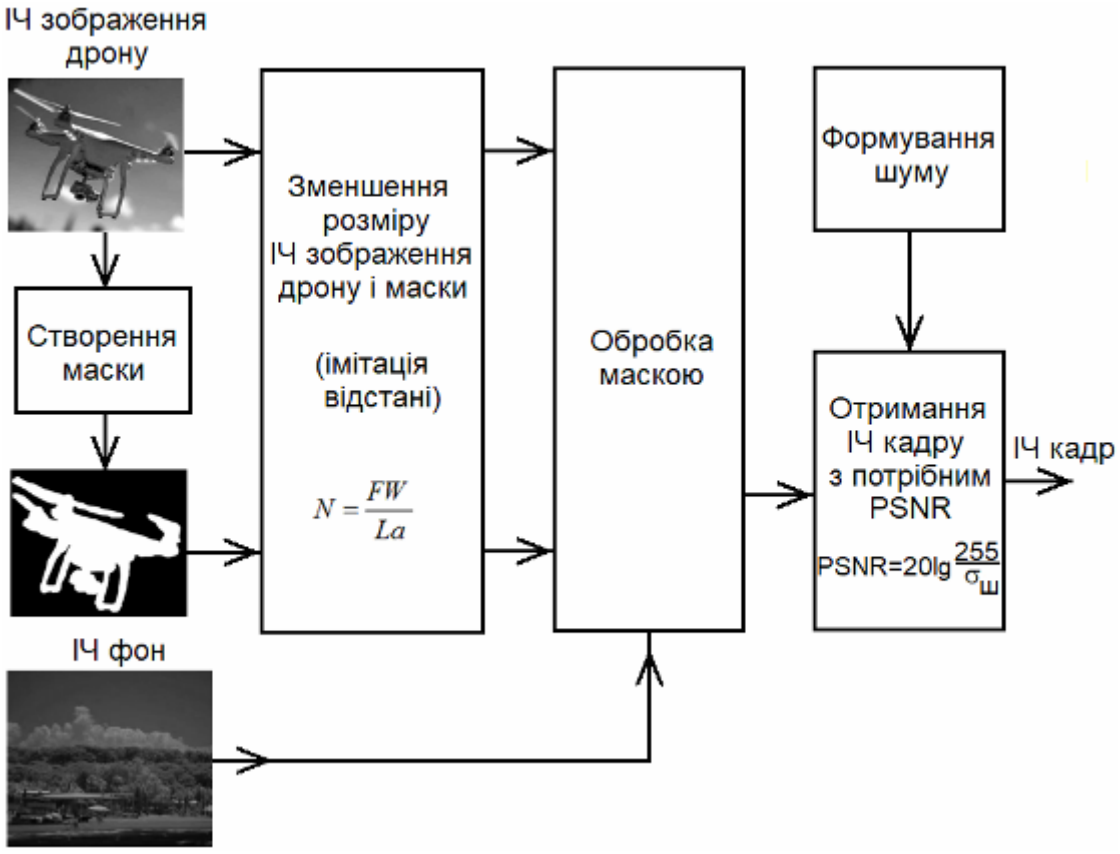


Рисунок 3.1 – Алгоритм отримання навчальної бази зображень

Для врахування характеристик зображення БПЛА потрібно отримати певну кількість його зображень в ближньому ІЧ діапазоні з доволі високим розрізненням в різних ракурсах і за різних режимів польоту. Також потрібно отримати базу ІЧ фонових зображень різних об'єктів – будинків, дерев, кущів, хмар, людей, птахів. Це потрібно для дослідження процесу розпізнавання БПЛА на різному фоні.

Для моделювання знаходження БПЛА на заданій відстані потрібно пропорційно зменшувати розмір N тестових зображень з урахуванням параметрів оптики системи спостереження і фізичного розміру БПЛА [5]:

$$N = \frac{FW}{Ld}, \tag{3.1}$$

де L – відстань до БПЛА,

F – фокусна відстань об'єктива камери,

W – фізичний розмір БПЛА,

N – розмір зображення БПЛА,

d – фізичний розмір пікселя матриці.

В результаті обробки з маскою отримаємо потрібну кількість зображень БПЛА з різних дальностей і з різними відношеннями сигнал-шум (PSNR – peak signal-to-noise ratio) [1]:

$$PSNR = 20 \lg \frac{255}{\sigma_ш}, \tag{3.2}$$

де 255 – максимальна різниця рівнів чорного і білого;

$\sigma_ш$ – середньоквадратичне відхилення шуму.

Розглянемо практичні методи отримання фото- і відеозображень в ближньому інфрачервоному діапазоні ($\lambda \approx 800$ нм).

3.2 Методи отримання фото- і відеозображень в ближньому інфрачервоному діапазоні

Інфрачервона (ІЧ) фотографія дозволяє відобразити на фото відбите в інкрачервоному діапазоні світло. Будь-яка фотозйомка відображає відбите світло. Але у випадку з ІЧ-фотографією, йдеться про невидимий для очей діапазон.

Видимий спектр світла включає діапазон довжини світлових хвиль приблизно від 400 нм до 700 нм. При цьому потрібно уточнити, що така фотографія не відображає те, наскільки окремі предмети теплі або холодні, для цього потрібні специфічніші прилади, матриці фотоапаратів на це не здатні.

Фотографія в інфрачервоному діапазоні відображає світло у ближньому ІЧ-діапазоні в районі ~800 нанометрів. По суті, це світло знаходиться на межі того, що ми можемо бачити на власні очі. Для порівняння, тепловізори нічного бачення знімають у діапазоні 8000-15000 нанометрів. Це діапазон далекого інфрачервоного випромінювання. Ми ж працюватимемо у ближньому ІЧ-випромінюванні 700…1400 нм.

Для того, щоб на фото було видно лише інфрачервоний спектр, необхідно відсікти все інше світлове випромінювання. Для цього використовуються спеціальні світлофільтри.

Одним з найбільш рекомендованих та популярних є Hoya R72 Infrared. Фільтр відсікає приблизно 11 стопів світла (що відповідає ND2000):

$$f-stop = \log_2 K, \quad \text{або} \quad K = 2^{f-stop} = 2^{11} = 2048. \qquad (3.3)$$

Як результат, фільтр Hoya R72 блокує близько 95% світла, що потрапляє на матрицю. У підсумку камера приймає тільки хвилі в районі 760…860 нм. Зовнішній вигляд інфрачервоного світлофільтра «нейтральної» щільності Hoya R72 показаний на рис.3.2.



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд інфрачервоного світлофільтра «нейтральної» щільності Hoya R72

На рис.3.3 показана спектральна характеристика інфрачервоного світлофільтра Hoya R72.

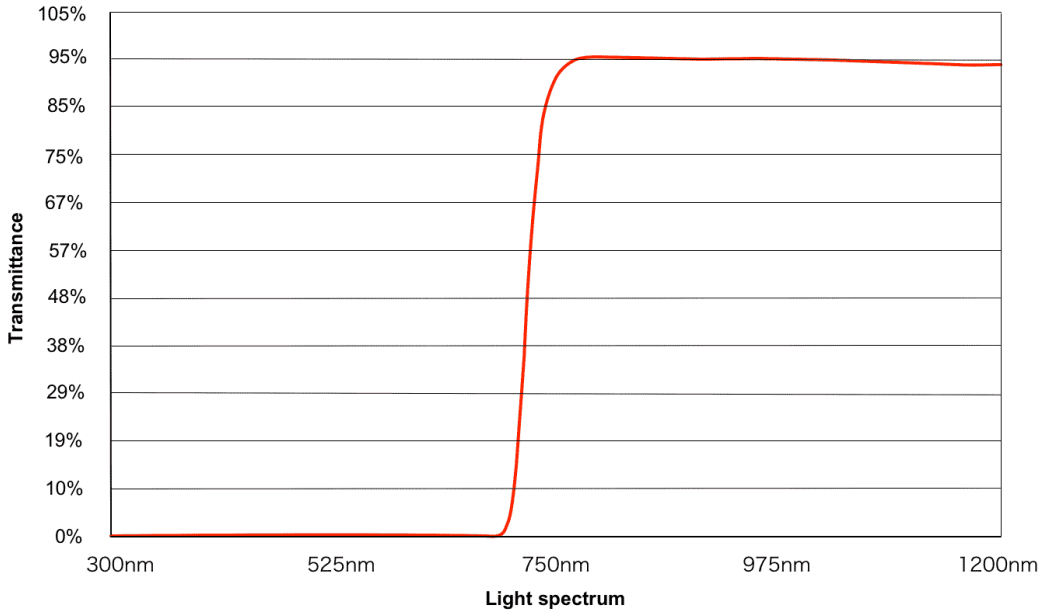


Рисунок 3.3 – спектральна характеристика інфрачервоного світлофільтра Hoya R72

Інфрачервоний фільтр R72 не пропускає хвилі з довжиною до 740 нм, пропускаючи в об’єктив лише світло в червоній зоні та інфрачервоному спектрі. Від 760 нм пропускання світла становить 95%.

Оскільки інфрачервоне світло знаходиться виключно в червоному колірному спектрі, усі області на зображеннях також відображаються в різних червоних тонах. Для досягнення чорно-білого стилю, унікального для

інфрачервоної фотографії, важливо встановити правильний баланс білого перед переходом зображення до чорно-білого режиму під час постобробки. Основна відмінність тут полягає в тому, що чорно-білий контраст відрізняється від типових чорно-білих налаштувань камери або через постобробку під час зйомки без фільтра (рис.3.4).



Рисунок 3.4 – Приклад зображення у ближньому ІЧ діапазоні

Слід зазначити, що у вихіднику така картинка виглядатиме як дуже червона (рис.3.5).



Рисунок 3.5 – Вихідник зображення у ближньому ІЧ діапазоні

При цьому витримки такої фотографії будуть настільки довгими, що без штативу не обійтися. Жодна стабілізація (що оптична, що матрична) не дозволить зручно знімати з витримками від 1 с до 15 с. Конкретне значення залежить від величини діафрагми.

Тому найліпшим варіантом вбачається застосування зйомки дрону в приміщенні без освітлення з інфрачервоним прожектором на однорідному, наприклад, чорному фоні (рис.3.6).



Рисунок 3.6 – Зйомка дрону в приміщенні без освітлення з інфрачервоним прожектором на однорідному чорному фоні

Це дасть можливість отримати багато знімків дрону з різних ракурсів без застосування ІЧ світлофільтру.

Для вибору правильної відстані від прожектора до дрону треба дослідити просторові характеристики випромінення ІЧ прожектора.

3.3 Дослідження просторових характеристик випромінення інфрачервоного прожектора

Дослідження проводилося для ІЧ прожектора з довжиною хвилі 820 нм електричною потужністю 2,4 Вт (12 В х 200 мА) на 48 LED випромінювачів з кутом освітлення 45° (рис.3.7, а). Живлення здійснювалося від зовнішнього блока 12 В від Wi-Fi роутера (рис.3.7, б).



а) б)

Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд інфрачервоного прожектора (а) і блока живлення (б)

Експеримент проводився в затемненій кімнаті. На вертикальній стіні за допомогою скотчу був закріплений білий лист формату А1. Освітлення листа здійснювалося посередині перпендикулярно стіні. Зйомка ІЧ плями велася на камеру смартфона, який розташовувався праворуч поряд з прожектором. Схема експерименту показана на рис.3.8.

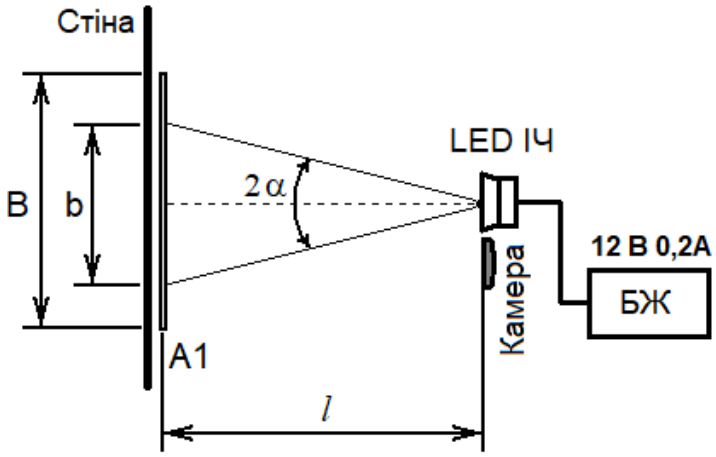


Рисунок 3.8 – Схема експерименту

Відстань l від прожектора до листа обиралася із розрахунку, щоби видимий діаметр плями b був приблизно вдвічі менше ширини листа B:

$$b \approx B/2. \qquad (3.4)$$

Для цього відстань потрібно обирати із співвідношення

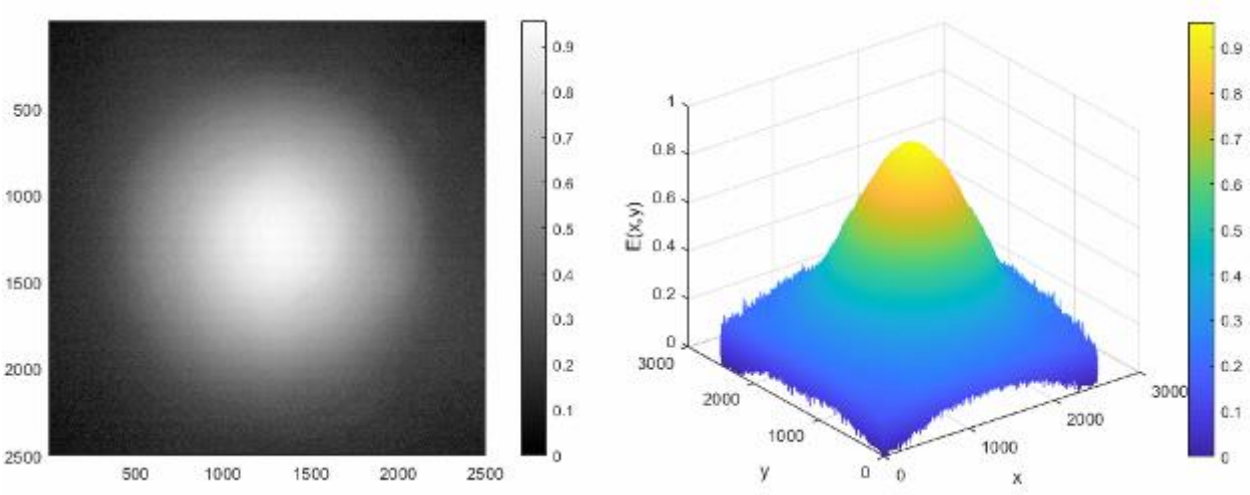
$$l \approx \frac{b}{2tg\alpha} = \frac{B}{4tg\alpha}. \qquad (3.5)$$

В нашому випадку $\alpha = 45° / 2 = 22{,}5°$, для формату А1 $B = 0{,}594$ м. Тобто відстань

$$l \approx \frac{0{,}594}{4 \cdot tg\, 22{,}5°} = 0{,}36 \text{ м}.$$

Камера смартфону має достатню чутливість в ближньому ІЧ діапазоні. Зроблені фотознімки завантажувалися в MATLAB і далі оброблялися. Програма обробки результатів експерименту надана в додатку А.

На рис. 3.9 показані зображення освітленості плями ІЧ прожектора у вигляді напівтонового зображення (а) і у тривимірному поданні (б).



а) б)

Рисунок 3.9 – Зображення освітленості плями ІЧ прожектора у вигляді напівтонового зображення (а) і у тривимірному поданні (б)

Задачею дослідження є виявлення закону просторового розподілу яскравості плями (діаграми спрямованості) прожектора, експериментальне визначення ширини променя, її відповідності заявленим характеристикам прожектора, а також визначення відстані від прожектора до БПЛА, при якій можна знехтувати нерівномірністю освітлення.

На рис.3.10 показано графік освітленості в горизонтальному січенні посередині плями прожектора. Горизонтальна вісь позначена в пікселях зображення.

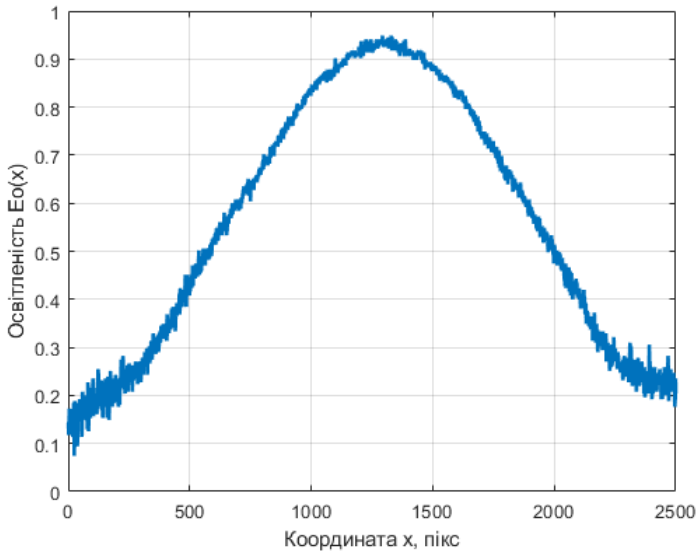


Рисунок 3.10 – Графік освітленості в горизонтальному січенні посередині плями прожектора

Помітно, що освітленість плями плавно спадає від центра до країв. Для того, щоби перейти від пікселів x до кутової координати α, використаємо співвідношення:

$$\alpha^\circ = \frac{180^\circ}{\pi} arctg\left(\frac{x - x_0}{X/2}\right), \tag{3.6}$$

де x_0 – координата середини ІЧ плями,

X – ширина ІЧ плями в пікселях.

На рис.3.11 показано графік залежності освітленості плями від кутової координати α за результатами експерименту. Там же для порівняння показано графік апроксимуючої функції

$$E_a = 0{,}95 \cdot \cos^2 \alpha^\circ, \tag{3.7}$$

де множник 0,95 підібрано задля максимальної подібності.

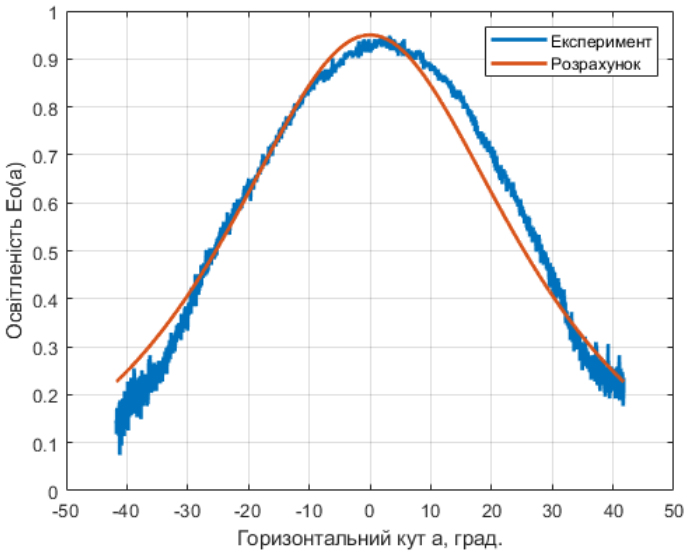


Рисунок 3.11 – Графік залежності освітленості плями від кутової координати α (експеримент і апроксімація)

Аналізуючи графіки на рис.3.11 по-перше слід відмітити, що діаграма спрямованості ІЧ прожектора добре апроксимується функцією $\cos^2\alpha°$. Ширина діаграми 2α по рівню 0,5 складає близько 50°, що приблизно співпадає із заявленим параметром 45°.

Ширина плями, де освітленість змінюється не більше, ніж на 5% дорівнює приблизно $2\alpha_e \approx 10°$. Звідси обираємо відстань до прожектора при проведенні експерименту:

$$l_e > \frac{b_e}{tg\alpha_e}, \tag{3.8}$$

де b_e – горизонтальний розмір дрону.

Для дрону DJI Phantom 3 горизонтальний розмір b_e=0,33 м, тому

$$l_e > \frac{0{,}33}{tg5°} = 3{,}77 \text{ м}. \tag{3.9}$$

Отже, для проведення подібного експерименту потрібно мати приміщення з розміром 4 м і більше.

3.4 Алгоритм отримання інфрачервоних зображень з заданим відношенням сигнал-шум

На практиці експлуатації системи виявлення БПЛА в ІЧ діапазоні відеосигнал буде мати недостатнє велике відношення сигнал-шум. Така ситуація обумовлена роботою в умовах малої освітленості. При зменшенні відношення сигнал-шум у відеосигналі збільшується вірогідність помилкового спрацювання системи виявлення та вірогідність пропуску цілі. Тому моделювання роботи системи правильно проводити на зачумлених зображеннях.

Для отримання ІЧ зображень з заданим відношенням сигнал-шум використаємо наступний алгоритм:

– додаємо до тестового зображення шум із заданим законом розподілу;

– підбираємо середньоквадратичне відхилення шуму так, щоб забезпечити задане відношення сигнал-шум.

Як показують практичні дослідження, закон розподілу шуму матриць – білий нормальний з нульовим середнім. Пікове відношення сигнал-шум розраховують за формулою [1]:

$$PSNR = 20 \lg \frac{255}{\sigma_{ш}}, \tag{3.10}$$

де $PSNR$ – peak signal-to-noise ratio – пікове відношення сигнал-шум.

$PSNR$ – це інженерний термін, який означає відношення між максимумом можливого контрасту (в нашому випадку 255) і середньоквадратичним значенням шуму, що спотворює зображення.

З виразу (3.10) випливає

$$\sigma_{ш} = \frac{255}{10^{PSNR/20}}. \tag{3.11}$$

На рис.3.12, а показано червоний канал зображення дрону, а на рис.3.12, б – реалізація шуму при $PSNR = 20$ дБ.

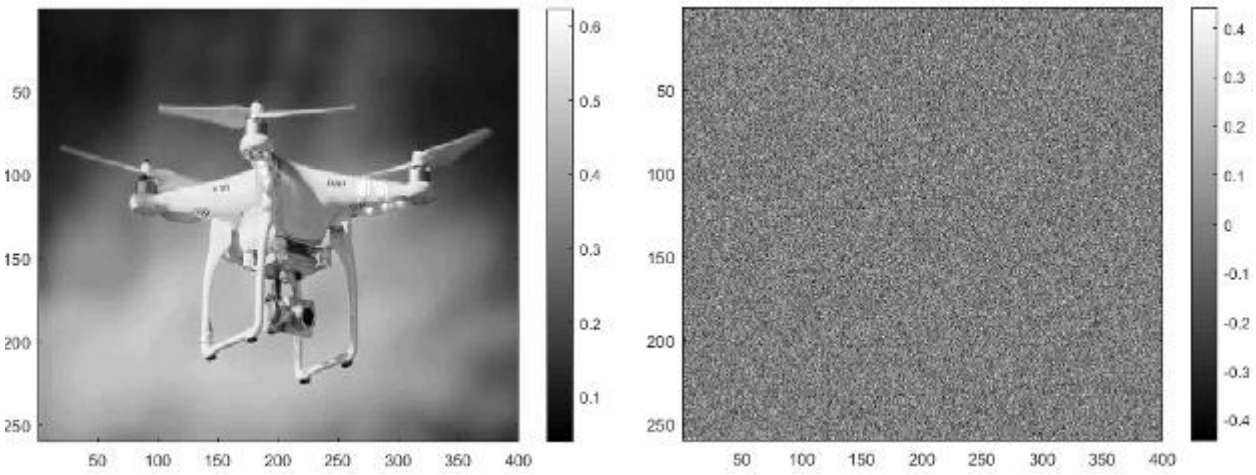
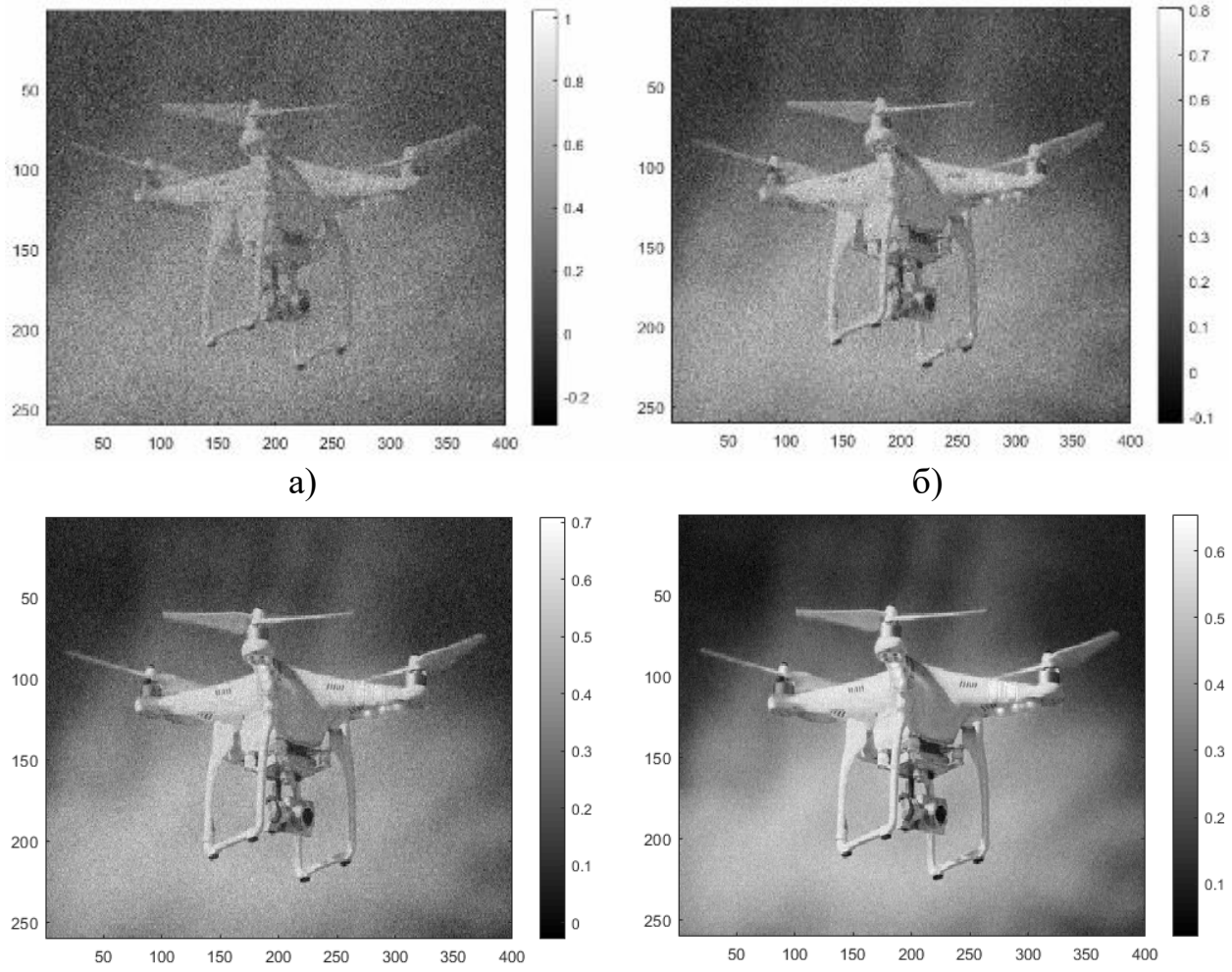


Рисунок 3.12 – Червоний канал зображення дрону (а) і реалізація шуму при $PSNR = 20$ дБ (б)

На рис. 3.13 показані зашумлені зображення дрону в червоному каналі при $PSNR = 20$ дБ (а), 25 дБ (б), 30 дБ (в) та 35 дБ (г).



а) б)

в) г)

Рисунок 3.12 – Зашумлені зображення дрону в червоному каналі при $PSNR = 20$ дБ (а), 25 дБ (б), 30 дБ (в) та 35 дБ (г)

Спостерігаючи зашумлені зображення візуально, можна відмітити правильність висновків у розділі 2, що розумною межею для роботи системи виявлення дронів в ІЧ діапазоні є відношення сигнал-шум 30 дБ. Зображення з меншим відношенням сингал-шум виглядають надто зашумленими і не слід очікувати в такому випадку від системи виявлення високих результатів. Зазначений висновок потребує подальших досліджень і перевірки на практиці.

3.5 Висновки по розділу 3

Запропоновано алгоритм отримання навчальної бази зображень дронів в ІЧ діапазоні. Він складається з таких етапів: отримання певної кількості зображень дрону в різних ракурсах з ІЧ підсвіткою в темному приміщенні; отримання бази ІЧ фонових зображень – будинків, дерев, кущів, хмар, людей, птахів; накладення масштабованого з урахуванням відстані і зміщення зображення дрона на фон; зашумлення результуючого зображення для отримання потрібного відношення сигнал-шум.

Розглянуто методи отримання фото- і відеозображень в ближньому ІЧ діапазоні. Одним методом є застосування інфрачервоного фільтру, який зменшує світловий потік у видимому діапазоні в 1000 разів. В результаті фото об’єктів потрібно робити при великих витримках – 10…30 с в денний час влітку із застосуванням штативу. Тобто, саме так і потрібно отримувати фонові зображення для моделювання роботи системи.

Зображення дрону, оскільки він рухається, потрібно проводити при наявності ІЧ прожектора в темній кімнаті. Це дасть можливість отримати багато знімків дрону з різних ракурсів без застосування ІЧ світлофільтру. Обґрунтовані умови експерименту зі зйомки дрону в приміщенні без освітлення з інфрачервоним прожектором на однорідному чорному фоні. Досліджені характеристики плями реального ІЧ прожектора, його діаграму

спрямованості. Визначено відстань від прожектора до БПЛА, при якій можна знехтувати неоднорідністю освітлення.

Складено та реалізовано алгоритм отримання зображень дрону із потрібним відношенням сигнал-шум. Отримані зображення дрону в червоному каналі при $PSNR = 20$, 25, 30 та 35 дБ. Спостерігаючи зашумлені зображення візуально, можна відмітити правильність висновків у розділі 2, що розумною межею для роботи системи виявлення дронів в ІЧ діапазоні є відношення сигнал-шум 30 дБ. Зображення з меншим відношенням сингал-шум виглядають надто зашумленими і не слід очікувати в такому випадку від системи виявлення високих результатів. Зазначений висновок потребує подальших досліджень і перевірки на практиці.

ВИСНОВКИ

Безпілотний літальний апарат – це літальний апарат без екіпажу на борту. БПЛА можуть вирішувати задачі розвідки, для завдання ударів по наземних і морських цілях, перехоплення повітряних цілей, здійснювати постановку радіоперешкод, управління вогнем, цілевказання та ін.

Своєчасне виявлення і протидія БПЛА є важливою складовою безпеки, як у військовий, так і у мирний час. Виявлення БПЛА в видимому діапазоні хвиль є досить ефективним методом. Воно дозволяє не тільки виявляти і розпізнати дрон, але й точно виміряти його координати і параметри руху. Проте така система може працювати лише в світлу частину доби.

Тепловий канал виявлення дронів може працювати вночі, але малий БПЛА має мале теплове випромінення, що обмежує можливості теплового каналу.

В даній роботі розглядається канал виявлення в ближньому ІЧ діапазоні на довжинах хвиль 800…900 нм з підсвіченням. На відміну від світлового прожектора така система матиме візуальну скритність і не привертатиме до себе зайву увагу. В той же час, ближній інфрачервоний канал суттєво розширює можливості роботи системи в темний час доби або в умовах недостатньої освітленості.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності дії ближнього інфрачервоного каналу з врахуванням енергетичних характеристик підсвічення, чутливості і спектральних характеристик відеокамер в ближньому інфрачервоному діапазоні.

В результаті аналізу встановлено, що важливішими параметрами для вирішення задач виявлення, розрізнення і впізнавання є чутливість системи і її просторово-частотна характеристика.

Енергетичні параметри системи в ближньому діапазоні залежать від підсвічення, об’єкту і чутливості камери. Розглянуто класичний підхід, коли у якості підсвічення використовується галогенова лампа з фільтром разом із

однолінзовим конденсором. Енергетичні оцінки такої системи показали недоцільність її використання. По-перше, система фокусування виходить надто громіздкою. По-друге, площа освітлення занадто менша за потрібну. Щоби забезпечити освітленість декілька лк на відстані близько 100 м потрібна електрична потужність лампи порядка кВт.

Більш ефективним є використання матричних LED прожекторів. Це дає зменшення габаритів і загальних технічних вимог до системи фокусування; збільшення освітленості на об’єкті за рахунок можливості вибору прожектора з більшою кількістю випромінювачів.

Проведено енергетичні оцінки системи відеоспостереження в ближньому ІЧ діапазоні. Виведені інженерні формули для розрахунку енергетичних параметрів системи освітлення: залежність освітленості на об’єкті спостереження від відстані для певного значення світлової потужності випромінювання; залежність потрібної світлової потужності від дальності дії заданої чутливості камери спостереження; залежність дальності дії інфрачервоної системи освітлення від енергетичного потенціалу системи.

Аналіз отриманих графіків показав, що великий потенціал для підвищення ефективності системи виявлення малих БПЛА в ближньому інфрачервоному діапазоні полягає в покращенні чутливості камери відеоспостереження. Чутливість сучасних камер може складати 1 лк і менше. В той же час, сучасні інфрачервоні прожектори можуть мати світлову потужність випромінення більше 100 Вт. Поєднання цих двох показників системи може дати дальність дії системи більше 100 м.

Для уточнення висновків проведено розрахунок чутливості камер в ближньому інфрачервоному діапазоні. Отримані графіки відношення сигнал-шум у відеозображенні в залежності від освітленості на об’єкті спостереження для роздільних здатностей відео 4k, FullHD, HD. Аналіз показав, що в режимі 4k відношення сигнал-шум 30 дБ досяжне при освітленості на об’єкті не менше 2,5 лк, а 35 дБ – при освітленості 8,5 лк. При цьому треба розуміти, що шуми такого рівня досить помітні на зображенні.

Збільшити освітленість на об’єкті досить важко на практиці внаслідок потреби застосування надто потужних ІЧ прожекторів. Тому при моделюванні роботи подобного роду систем виявлення БПЛА з використанням нейронних мереж слід орієнтуватися на зображення з *SNR*=30…35 дБ.

Процес виявлення і розпізнавання БПЛА може бути утруднений через зниження роздільної здатності, що обумовлено погіршенням, в порівнянні з природним освітленням, частотно-контрастної характеристики системи.

Отримана залежність потрібної освітленості на об’єкті від роздільної здатності системи для різних діагональних розмірів матриці. Задля отримання великої чутливості системи при збереженні високих роздільної здатності і відношення сигнал-шум потрібно використовувати камери з якнайбільшим розміром матриці. Серед доступних IP камер найбільший розмір 1/2".

Експериментальне дослідження будь-якої відеосистеми виявлення об’єктів передбачає використання нейтронної мережі, для навчання якої потрібно мати декілька сотень зображень об’єктів пошуку в різних ракурсах, з різною роздільною здатністю, різним відношенням сигнал-шум.

В наш воєнний час формування такої навчальної бази зображень є затрудненим внаслідок обмежень на польоти БПЛА і заборону на фото- і відеозйомку. Тому задачею даного розділу є обґрунтування експерименту з отримання потрібної навчальної бази шляхом моделювання і обробки зображень.

Запропоновано алгоритм отримання навчальної бази зображень дронів в ІЧ діапазоні. Він складається з таких етапів: отримання певної кількості зображень дрону в різних ракурсах з ІЧ підсвіткою в темному приміщенні; отримання бази ІЧ фонових зображень – будинків, дерев, кущів, хмар, людей, птахів; накладення масштабованого з урахуванням відстані і зміщення зображення дрона на фон; зашумлення результуючого зображення для отримання потрібного відношення сигнал-шум.

Розглянуто методи отримання фото- і відеозображень в ближньому ІЧ діапазоні. Одним методом є застосування інфрачервоного фільтру, який зменшує світловий потік у видимому діапазоні в 1000 разів. В результаті фото об'єктів потрібно робити при великих витримках – 10…30 с в денний час влітку із застосуванням штативу. Тобто, саме так і потрібно отримувати фонові зображення для моделювання роботи системи.

Зображення дрону, оскільки він рухається, потрібно проводити при наявності ІЧ прожектора в темній кімнаті. Це дасть можливість отримати багато знімків дрону з різних ракурсів без застосування ІЧ світлофільтру. Обґрунтовані умови експерименту зі зйомки дрону в приміщенні без освітлення з інфрачервоним прожектором на однорідному чорному фоні. Експеримент проводився в затемненій кімнаті. На вертикальній стіні за допомогою скотчу був закріплений білий лист формату А1. Освітлення листа здійснювалося посередині перпендикулярно стіні. Зйомка ІЧ плями велася на камеру смартфона, який розташовувався ліворуч поряд з прожектором.

Досліджені характеристики плями реального ІЧ прожектора, його діаграму спрямованості. Діаграма спрямованості добре апроксимується функцією $\cos^2\alpha°$. Ширина плями, де освітленість змінюється не більше, ніж на 5% дорівнює приблизно $10°$. Визначено відстань від прожектора до БПЛА, при якій можна знехтувати неоднорідністю освітлення.

Отримані зображення дрону в червоному каналі при $PSNR = 20$, 25, 30 та 35 дБ. Спостерігаючи зашумлені зображення візуально, можна відмітити правильність висновків у розділі 2, що розумною межею для роботи системи виявлення дронів в ІЧ діапазоні є відношення сигнал-шум 30 дБ. Зображення з меншим відношенням сингал-шум виглядають надто зашумленими і не слід очікувати в такому випадку від системи виявлення високих результатів. Зазначений висновок потребує подальших досліджень і перевірки на практиці.

Отже, мета і задачі кваліфікаційної роботи виконані у повному обсязі.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Телевидение: Учебник для вузов / В. Е. Джакония и др.; Под. ред. В. Е. Джаконии. Изд. 4-е. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 615 с.

2. Быков Р. Е. Теоретические основы телевидения: Учебник для ВУЗов. – СПб.: Изд-во «Лань», 1998. – 288 с.

3. Грязин Г. Н. Системы прикладного телевидения: Учебное пособие для ВУЗов. – СПб.: Политехника, 2000. – 277 с.

4. Антипин М. В. Интегральная оценка качества телевизионного изображения. – М.: Наука, 1970. – 154 с.

5. Бабенко В. С. Оптика телевизионных устройств. – М.: Радио и связь, 1982. – 257 с.

6. Барсуков Ф. И., Величкин А. И., Сухарев А. Д. Телевизионные системы летательных аппаратов. – М.: Сов. радио, 1979. – 255 с.

7. Батраков А. С., Летуновский А. В. Телевизионные системы. – Изд.-во МО СССР, 1986. – 376 с.

8. Волков В. Г. Телевизионные приборы для вождения транспорта в сложных условиях видимости // Техника кино и телевидения. – 2001. – № 5. – С. 31-34.

9. Грязин Г. Н. Телевизионная система для регистрации номерных знаков транспортных средств // Техника кино и телевидения. – 1992. – № 7. – С. 53-57.

10. Грязин Г. Н. К расчету частотных характеристик приборов с зарядовой связью. – Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2001. – Т. 44. – № 3. – С. 22-24.

11. Грязин Г. Н. О критериях оценки контраста изображения // Техника кино и телевидения. – 2000. – № 9. – С. 41.

12. Грязин Г. Н. К определению максимальной частоты видеосигнала, генерируемого матричным ПЗС // Техника кино и телевидения. – 2002. – № 9. – С. 32.

13. Ефимов А. С. Контрастная чувствительность зрения при наблюдении ТВ-изображения // Техника кино и телевидения. – 1977. – № 2. – С. 45-48.

14. Казанцев Г. Д., Курячий М. И., Пустынский И. Н. Измерительное телевидение. – М.: Высш. шк., 1994. – 288 с.

15. В.М. Карташов, В.Н. Олейников, М.М. Колендовская, Л.П. Тимошенко, Н.В. Рыбников, А.И. Капуста. Комплексирование изображений при обнаружении беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 201. – С. 120 – 129.

16. Raja Abdullah, Raja Syamsul Azmir. A Review of Copter Drone Detection Using Radar Systems // Science & Technology Research Institute for Defence (STRIDE), 2019. – pp. 16 – 38.

17. 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), Doha, Qatar, 2020. – pp. 29 – 34.

18. В.Н. Олейников, О.В. Зубков, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин, С.А. Шейко, И.С. Селезнев. Экспе-риментальная оценка эффективности алгоритмов пеленгования беспилотных летательных аппаратов по акустическому излучению. Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2019. – Вып. 199. – С. 29 – 37.

19. 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.

20. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Korytsev I.V., Babkin S. I., Sheiko S.A., Kolendovskaya M.M. Spatial-temporal Processing of acoustic Signals of Unmanned Aerial Vehicles/ Telecommunications and Radio Engineering. –New York. – 2020. – Vol. 79, №9. – P.769-780.

21. V. Kartashov, V. Oleynikov , I. Koryttsev, S. Sheiko, O. Zubkov, S. Babkin. Processing of Wide Band Acoustic Signals During Detection of Unmanned Aerial Vehicles // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). Kharkiv, Ukraine, September 21 - 25, 2020. Volume 1 on 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). pp. 35-39.

22. V. Kartashov, V. Oleynikov, O. Zubkov, S. Sheiko. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electron-ics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.

23. I. Koryttsev, S. Sheiko, V. Kartashov, O. Zubkov, V. Oleynikov, I. Selieznov, M. Anohin. Practical Aspects of Range Determination and Tracking of Small Drones by Their Video Observation // 2020 International Scientific-Practical Confer-ence. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.

24. И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.М. Карташов, О.В. Зубков, В.Н. Олейников, С.И. Бабкин, И.С. Селезнев. Обработка сигналов при пеленгации и определении дальности до малоразмерных БПЛА в оптическом и инфракрасном диапазонах // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.

25. В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, О.В. Зубков, С.И. Бабкин. Оптико-электронные методы обнаружения воздушных объектов и измерения их координат // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 153 – 159.

26. О.В. Зубков, С.А. Шейко, В.Н. Олейников, В.М. Карташов, И.В. Корытцев, С.И. Бабкин. Исследование эффективности детектирования и распознавания изображений дронов по видеопотоку // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 136 – 146.

27. Ю. Р. Носов, В. А. Шилин. Основы физики приборов с зарядовой связью. – М.: Наука, 1986. – 318 с.

28. Богомолов П. А., Сидоров В. И., Усольцев И. Ф. Приемные устройства ИК-систем. – М.: Радио и связь, 1987. – 208 с.

29. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоувза, Д. Моргана. – М.: Энергоиздат, 1981. – 372 с.

30. Дамьяновски В. CCTV, Библия видеонаблюдения, цифровые и сетевые технологи. – М.: ООО "Ай-Эс-Эс Пресс", 2006.

31. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для ВУЗов. – М.: Машиностроение, 1989. –360 с.

32. Уваров Н. Секреты высокой чувствительности ТВ камер / Алгоритм безопасности, №6, 2002. – с. 44-57.

33. Неизвестный С. И., Никулин О. Е. Приборы с зарядовой связью –основа современной телевизионной техники. Основные характеристики ПЗС / Специальная техника, №5, 1999.

34. Дьяконов, В. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. Самое подробное описание последних версий MATLAB, новые возможности Simulink / В. Дьяконов. – М.: Солон-Пресс, 2008. – 799 с.

35. 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.