

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)

Дослідження тепловізійного каналу виявлення малорозмірних
безпілотних літальних апаратів
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МІм-20-1
Білюк В.В.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Медіаінженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ситнік О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Карташов В.М.
(прізвище, ініціали)

2021 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

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Медіаінженерія

(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Білюку Вадиму Віталійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження тепловізійного каналу виявлення малорозмірних
безпілотних літальних апаратів.

затверджена наказом по університету від " 08 " 11 2021 р. № 1676 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08.12.2021 р.

3. Вихідні дані до роботи Провести аналітичний огляд методів приймання випромінень
теплового діапазону. Виконати оцінку дальності дії тепловізора з врахуванням критерію
розрізнення Джонсона. Отримати характеристики виявлення малого дрону DJI Phantom 3.
Експериментально отримати тестові тепловізійні зображення дрону, птахів, а також
моделі теплового фону атмосфери. Методом експертних оцінок отримані коефіцієнти
зменшення дальності дії тепловізорів при спостереженні дронів в реальних умовах.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

Вступ

1. Аналіз фізичних основ теплобачення і принципів побудови тепловізорів.

2. Оцінка потенційних можливостей виявлення та розпізнавання дронів
у тепловізійному каналі.

3. Експериментальне дослідження характеристик виявлення дронів
в тепловізійному каналі.

Висновки

Перелік посилань

Додатки

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

1. Методи моніторингу та виявлення БПЛА.
2. Постановка задачі.
3. Принцип дії і характеристики тепловізорів.
4. Критерій виявлення.
5. Розрахунок дальності дії тепловізора.
6. Результати розрахунку дальності.
7. Врахування характеристик об'єкту і фону.
8. Схема експерименту.
9. Отримання тепловізійних зображень.
10. Формування моделі фону.
11. Експертна оцінка характеристик виявлення.
12. Висновки.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналітичний огляд літератури	02.11.21–10.11.21	
2	Вибір критерію ефективності	11.11.21–17.11.21	
3	Оцінка виявної здатності	18.11.21–24.11.21	
4	Розрахунок дистанцій виявлення	25.11.21–1.12.21	
5	Проведення експерименту	02.12.21–8.12.21	
6	Обробка результатів досліджень	25.11.21–8.12.21	
7	Графічна частина роботи	25.11.21–8.12.21	
8	Перевірка керівником	9.12.21–10.12.21	
9	Перевірка на академічний плагіат	11.12.21	
10	Перевірка завідувачем кафедри, рецензування	12.12.21–14.12.21	

Дата видачі завдання _____ 08.11.2021 р. _____

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи (проекту) _____

(підпис)

проф. Ситнік О.В. _____

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 66 сторінок, 20 рисунків, 7 таблиць, 50 джерел.

БПЛА, ВИЯВЛЕННЯ, ІДЕНТИФІКАЦІЯ, ІНФРАЧЕРВОНИЙ, РОЗРІЗНЕННЯ, ТЕПЛОБАЧЕННЯ, ТЕПЛОВІЗОР, ТЕМПЕРАТУРНА КОНТРАСТНІСТЬ, ТЕПЛОВИЙ ФОН

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки сигналів в тепловізійному каналі для задач виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів в тепловізійному каналі з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

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

В кваліфікаційній роботі проведено аналітичний огляд методів приймання випромінень теплового діапазону, виконано оцінку дальності дії тепловізора з врахуванням критерію розрізнення Джонсона, отримані характеристики виявлення малого дрону DJI Phantom 3, експериментально отримані тестові тепловізійні зображення дрону, птахів, а також моделі теплового фону атмосфери, методом експертних оцінок отримані коефіцієнти зменшення дальності дії тепловізорів при спостереженні дронів в реальних умовах.

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка к квалификационной работе: 66 страниц, 20 рисунков, 7 таблиц, 50 источников.

БПЛА, ВЫЯВЛЕНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ, ИНФРАКРАСНЫЙ, РАЗРЕШЕНИЕ, ТЕПЛОВИДЕНИЕ, ТЕПЛОВИЗОР, ТЕМПЕРАТУРНАЯ КонтРАСТНОСТЬ, ТЕПЛОВЫЙ ФОН

Объект исследования – процессы приема и обработки сигналов в тепловизионном канале для задач обнаружения, распознавания и идентификации малых дронов.

Цель исследования – получить числовые оценки дальности обнаружения, распознавания и идентификации малых дронов в тепловизионном канале с учетом характеристик излучения цели и фона.

Методы исследования – теоретический анализ, числовые расчеты, математическое моделирование, статистическая обработка данных.

В квалификационной работе проведен аналитический обзор методов приема излучений теплового диапазона, выполнена оценка дальности действия тепловизора с учетом критерия различения Джонсона, получены характеристики обнаружения малого дрона DJI Phantom 3, экспериментально получены тестовые тепловизионные изображения дрона, птиц, а также модели теплового фона, методом экспертных оценок получены коэффициенты уменьшения дальности действия тепловизоров при наблюдении дронов в реальных условиях.

ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work: 66 pages, 20 figures, 7 tables, 50 sources.

UAV, DETECTION, IDENTIFICATION, INFRARED, DISTINCTION, THERMAL VISION, THERMAL VISOR, TEMPERATURE CONTRAST, THERMAL BACKGROUND

Object of research – the processes of reception and processing of signals in the thermal imaging channel for the tasks of detection, recognition and identification of small drones.

The purpose of the study is to obtain numerical estimates of the range of detection, recognition and identification of small drones in the thermal imaging channel, taking into account the characteristics of the target radiation and background.

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

In the qualification work the analytical review of methods of reception of radiation of thermal range is carried out, the estimation of range of action of the thermal imager taking into account criterion of distinction of Johnson is carried out, characteristics of detection of small drone DJI Phantom 3 are received. estimates of the coefficients of reduction of the range of the pharmacists in the observation of drones in real conditions.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів.....	9
Вступ.....	10
1 АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ТЕПЛОБАЧЕННЯ І ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТЕПЛОВІЗОРІВ.....	12
1.1 Формування сигналів у системах теплобачення.....	12
1.2 Характеристики та параметри оптичного випромінювання.....	13
1.3 Закони теплового випромінювання.....	15
1.4 Характеристики та параметри випромінювання реальних об'єктів.....	17
1.5 Поширення теплового випромінювання у атмосфері.....	19
1.6 Модель тепловізійного каналу.....	20
1.7 Математичні моделі джерел сигналів.....	21
1.7.1 Математичні моделі сигналів від об'єктів.....	21
1.7.2 Математичні моделі фонових утворень.....	25
1.8 Висновки по розділу 1.....	30
2 ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ДРОНІВ У ТЕПЛОВІЗІЙНОМУ КАНАЛІ.....	31
2.1 Вибір критерію ефективності тепловізійного каналу спостереження.....	31
2.1.1 Критерій Джонсона.....	31
2.1.2 Інші критерії розпізнавання об'єктів.....	35
2.2 Фактори, які впливають на ефективність розпізнавання дронів в реальних умовах.....	35
2.3 Оцінка виявної здатності тепловізійного каналу.....	41
2.4 Розрахунок дистанцій виявлення, розрізнення і ідентифікації дронів.....	44
2.5 Висновки по розділу 2.....	47
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ В ТЕПЛОВІЗІЙНОМУ КАНАЛІ.....	48

3.1 Постановка задачі.....	48
3.2 Експериментальне отримання тестових тепловізійних зображень.....	50
3.3 Формування моделі фону.....	53
3.4 Експертна оцінка характеристик виявлення.....	54
3.5 Висновки по розділу 3.....	57
Висновки.....	58
Перелік посилань.....	62
Додаток А. Графічний матеріал.....	67
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	80

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- FLIR (Forward Looking Infrared) – інфрачервона система прямого бачення;
SCR (signal to clutter ratio) – відношення сигнал-фон;
АЧТ – абсолютно чорне тіло;
БПЛА – безпілотний літальний апарат;
ІЧ – інфрачервоний;
ОЕП – оптико-електронний перетворювач;
ОЕС – оптико-електронна система спостереження;
ПНБ – прилад нічного бачення;
ТВЛ – телевізійні лінії;
ТПС – тепловізійна система;
 a – розмір одиничного елемента зображення (розмір пікселя сенсора);
 h – кількість елементів сенсора по вертикалі (горизонталі);
 L – гранична дальність розрізнення;
 L_o – яскравість об'єкта;
 \bar{L}_ϕ – середня яскравість фону;
 F – фокусна відстань об'єктива;
 N – значення критерію Джонсона;
 P – потужність випромінювання;
 S – площа поверхні об'єкта;
 $T_{\text{ц}}$ – абсолютна температура цілі;
 T_ϕ – абсолютна температура фону;
 W – критичний розмір цілі;
 ε – коефіцієнт випромінювання поверхні;
 ϕ – поле зору сенсора по вертикалі (горизонталі);
 σ_ϕ – середньоквадратичне відхилення нерівномірності фону.

ВСТУП

Сьогодні безпілотні літальні апарати знаходяться у вільному доступі, за ціною вони досить доступні та легкі в управлінні. Їхню появу люди сприйняли з радістю і зараз дрони активно використовуються у повсякденному житті, наприклад, у тих самих зйомках весільних урочистостей. В той же час фахівці з безпеки б'ють тривогу, адже ці апарати, як з'ясувалося, становлять досить велику небезпеку для суспільства.

З моменту появи дрони швидко дешевшали і ставали більш досконалими та доступними для все ширших верств населення. На сьогодні за статистикою продаж дронів швидко збільшується. За прогнозами експертів у 2022 році обсяг їх продажів досягне 15 млрд., зі збільшенням продажів дронів зростає і статистика вчинених із застосуванням злочинів.

Сьогодні, наприклад, є факти, коли дрони використовували для перевезення наркотиків. Крім того, відомі випадки коли дрони використовували педофіли для спостереження за дітьми, а також злодії для стеження за приватними будинками без господарів та подальшої крадіжки з них.

Безпілотники можуть розвивати швидкість, що перевищує 100 км/год., радіус їх дії становить більше 2 км, вони здатні підніматися дуже високо навіть вище хмарочосів і парити над хмарами навіть на висоті польоту авіалайнерів, що знову ж таки становить загрозу і може створити аварійну ситуацію, такі факти також вже мали місце бути у світовій практиці.

Любителі сьогодні в Інтернеті викладають різні відеоролики, які демонструють різні способи забезпечити ці пристрої зброєю. Експерти відзначають небезпеку використання дронів у місцях скупчення громадян. У світовій практиці були випадки, коли літальний апарат, що впав у натовп, покалічив людей.

Сучасні дрони мають низький рівень помітності. Для виявлення дронів використовують радіолокаційний, радіочастотний, акустичний і оптико-

електронний канали, а також комплексують ці методи. В даній кваліфікаційній роботі тепловізійний канал розглядається як один з каналів у комплексованій системі виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів.

Об'єкт дослідження – процеси приймання і обробки сигналів в тепловізійному каналі для задач виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів в тепловізійному каналі з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

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

В роботі оброблюються результати експериментів, проведених колективом кафедри МІРЕС при виконанні низки наукових робіт з комплексної обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів для виявлення безпілотних літальних апаратів, визначення їх координат та параметрів руху.

1 АНАЛІЗ ФІЗИЧНИХ ОСНОВ ТЕПЛОБАЧЕННЯ І ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ ТЕПЛОВІЗОРІВ

1.1 Формування сигналів у системах теплобачення

Розглянемо схему роботи тепловізорів (рис. 1.1) [1-3, 12].

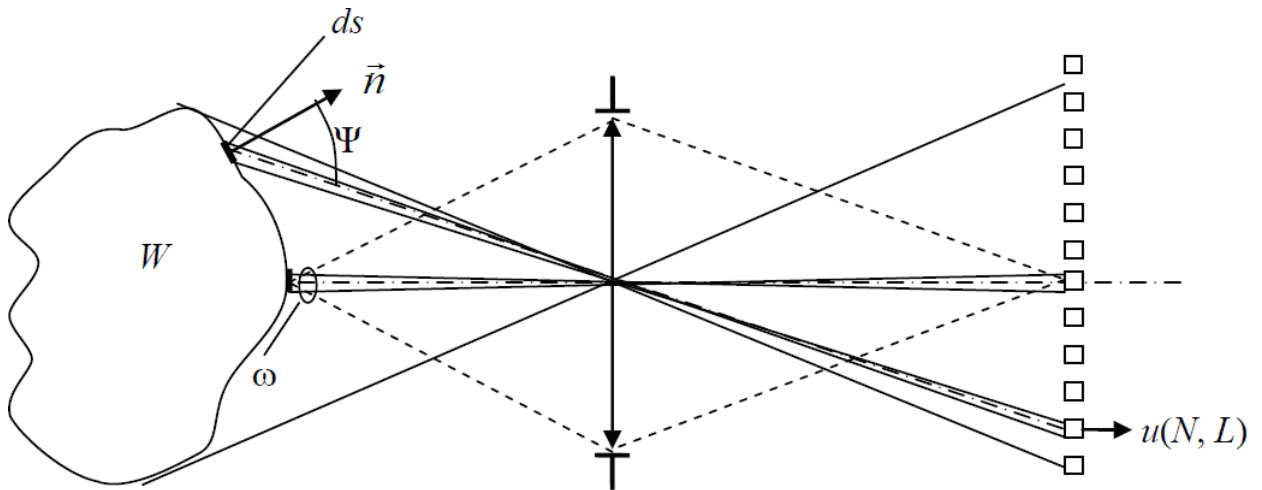


Рисунок 1.1 – Схема роботи тепловізорів

На рис.1.1 введено такі позначки:

W – світимість теплового випромінювання об'єкта спостереження;

ω – передній апертурний кут оптичної системи тепловізора;

ds – елемент поверхні об'єкта спостереження,

нормаль \vec{n} до якого складає кут Ψ з напрямком спостереження;

$u(N, L)$ – величина відеосигналу приймача випромінювання;

N – номер рядка елемента зображення;

L – номер елемента у рядку тепловізійного кадру.

Величина відеосигналу $u(N, L)$ визначається за наступною формулою:

$$u(N, L) = \frac{1}{\pi} \omega ds \cos \Psi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) W(\lambda, T, x', y') d\lambda, \quad (1.1)$$

де

$$W(\lambda, T, x', y') = \frac{1}{S(x, y)} \int W(\lambda, T, x, y) H(x'-x, y'-y) dx dy; \quad (1.2)$$

$$W(\lambda, T, x, y) = \varepsilon(\lambda, T, x, y) W^0(\lambda, T) \varepsilon(\Psi); \quad (1.3)$$

$$W^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}. \quad (1.4)$$

В формулах (1.2)–(1.4) прийняті такі позначення:

$H(x'-x, y'-y)$ – функція розсіювання точки (ФРТ) оптичної системи тепловізора;

s – спостерігаєма поверхня об'єкта;

ε – коефіцієнт випромінювання об'єкта;

W^0 – світимість абсолютно чорного тіла (АЧТ).

На підставі співвідношень (1.1)–(1.4) можна виразити залежність величини відеосигналу u в тепловізорах від абсолютної температури T та коефіцієнта випромінювання:

$$u(\lambda) = K_\lambda \varepsilon_\lambda C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (1.4)$$

де K_λ – коефіцієнт пропорційності, який характеризує вплив параметрів оптичної системи тепловізора, приймача випромінювання, об'єктно-атмосферної обстановки на зображення в системах теплобачення.

1.2 Характеристики та параметри оптичного випромінювання

Розглянемо геометричні співвідношення, що існують між випромінювальною та освітлюваною поверхнями. Ці співвідношення при випромінюванні ілюструються на рис.1.2

На рис.1.1 введено такі позначки:

A – випромінююча поверхня;

dA – елемент випромінюючої поверхні,

r – відстань від точки O елемента випромінюючої поверхні dA до точки C елемента освітлюваної поверхні dA_1 .

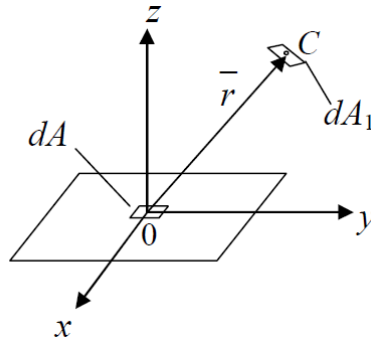


Рисунок 1.2 – Геометричні співвідношення при випромінюванні

Частка енергії випромінювання, що потрапляє поверхню A_1 від елемента dA випромінюючої поверхні, визначається в межах конуса, що має основу на поверхні A_1 та вершину в точці O . Кількісно цей конус характеризується тілесним кутом

$$\Omega = \iint_{A_1} \frac{dA_1}{r^2} = \iint_{\alpha\beta} \sin(\beta) d\alpha d\beta. \quad (1.5)$$

Оптичне випромінювання характеризують такими фізичними величинами [4]:

– енергія випромінювання $W = \langle W \rangle$ [Вт·с] або [Дж] – енергія, що переноситься випромінюванням;

– потік випромінювання $\Phi = \langle W \rangle / T$ [Вт] – фізична величина, що визначається відношенням енергії, що переноситься випромінюванням, на час перенесення, яке значно перевищує період електромагнітних коливань;

– енергетична яскравість випромінювання $L = d^2\Phi / dAd\Omega \cos\beta$ [Вт/(м²ср)] – фізична величина, що визначається відношенням потоку випромінювання, що проходить в розглянутому напрямку в межах малого тілесного кута $d\Omega$ через ділянку поверхні dA , до добутку цього тілесного

кута, площі ділянки та косинуса кута β між напрямом, що розглядається, і нормаллю до ділянки dA ;

– сила випромінювання $L = d\Phi/d\Omega = L \cos\beta dA$ [Вт/ср] – фізична величина, що визначається відношенням потоку випромінювання, що поширюється від джерела у розглянутому напрямку всередині малого тілесного кута, до цього тілесного кута;

– енергетична світимість $L = d\Phi/dA = \int_{\Omega} L \cos\beta d\Omega$ [Вт/м²] – фізична величина, що визначається відношенням потоку випромінювання від розглянутої малої ділянки поверхні до площі цієї ділянки;

– опроміненість $E = d\Phi/dA$ [Вт/м²] – фізична величина, що визначається відношенням потоку випромінювання, що падає на малу ділянку поверхні, до площі цієї ділянки.

Усі перелічені фізичні величини можна розглядати як спектральні, тобто залежні від довжини хвилі, чи як інтегральні. У першому разі ці величини мають сенс спектральних густин.

1.3 Закони теплового випромінювання

Закон Кірхгофа.

Для теплового джерела на даній довжині хвилі та за певної температури відношення величини, що характеризує випромінювальну здатність, до величини, що характеризує поглинальну здатність, є величина постійна, рівна випромінювальній здатності абсолютно чорного тіла (АЧТ), а саме

$$\frac{e(\lambda, T)}{a(\lambda, T)} = \frac{e^{\circ}(\lambda, T)}{a^{\circ}(\lambda, T)} = \dots = f_{e\lambda}(\lambda, T). \quad (1.6)$$

Насправді теплове випромінювання реальних джерел характеризують коефіцієнтом теплового випромінювання (коефіцієнтом чорноти)

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_{e\lambda}(\lambda, T)}{M_{e\lambda}^0(\lambda, T)}, \quad (1.7)$$

де $M_{e\lambda}^0(\lambda, T)$ – спектральна енергетична світність АЧТ.

Якщо $\varepsilon(\lambda, T) = \text{const}$, то теплове джерело називається сірим.

Закон Планка.

Цей закон характеризує розподіл спектрального випромінювання АЧТ при заданій температурі T , а саме

$$M_{e\lambda}^0(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (1.8)$$

де $C_1 = 3,74 \cdot 10^4$ [Вт·мкм⁴/см²],

$C_2 = 1,4388 \cdot 10^4$ [мкм·К].

Закон Віна.

Визначає положення екстремуму функції Планка

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T^0 K} \text{ [мкм]}. \quad (1.9)$$

Другий закон Віна.

Визначає значення спектральної світності АЧТ на довжині хвилі λ_{\max} а саме,

$$M_{e\lambda_{\max}}^0 = 1,2864 \cdot 10^{-15} T^5 \text{ [Вт/(см}^2\text{мкм)]}. \quad (1.10)$$

Закон Стефана-Больцмана.

Інтегральна енергетична світність АЧТ у діапазоні довжин хвиль від 0 до ∞ дорівнює

$$M_e^0(T) = \sigma T^4 \text{ [Вт/см}^2\text{]}. \quad (1.11)$$

Закон Ламберта.

Сила випромінювання J ідеального дифузного випромінювача пропорційна косинусу кута між нормаллю до випромінюючої поверхні та напрямом спостереження, тобто

$$J(\alpha, \beta) = J_0 \cos \beta. \quad (1.12)$$

Для плаского ламбертовського випромінювача справедливе також наступне співвідношення

$$M = \pi L. \quad (1.13)$$

1.4 Характеристики та параметри випромінювання реальних об'єктів

Власне випромінювання реальних тіл відрізняється від випромінювання АЧТ. Мірою відмінності служить спектральний коефіцієнт спрямованого теплового випромінювання

$$\varepsilon(\lambda, T, \alpha, \beta) = \frac{L_{e\lambda}(\lambda, T, \alpha, \beta)}{L_{e\lambda}^0(\lambda, T, \alpha, \beta)}. \quad (1.14)$$

Реальні теплові джерела ділять на селективні та неселективні-"сірі", для яких $\varepsilon(\lambda, T, \alpha, \beta) = \varepsilon(\lambda, T, \alpha)$. Найбільшу селективність випромінювання мають газоподібні речовини. У твердих речовин селективність випромінювання значно менше, причому, чим вище шорсткість поверхні, тим менше селективність, як у довжинах хвиль, і у напрямку.

Випромінювання реальних тіл складається з власного випромінювання та відбитого. Зокрема, для дифузних тіл справедливе співвідношення

$$M_{e\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T)M_{e\lambda}^0(\lambda, T) + [1 - \varepsilon(\lambda, T)]E_{e\lambda}(\lambda). \quad (1.15)$$

При збільшенні температури об'єкта коефіцієнт теплового випромінювання зростає, але ця залежність дуже слабка. У більшості практичних випадків у межах поля зору тепловізорів яскравість змінюється незначною мірою. Тому зазвичай приймають, що коефіцієнт теплового випромінювання для заданого ракурсу спостережуваного об'єкта залежить від кутів візування. На підставі цього при енергетичних розрахунках використовують таку формулу для визначення спостерігаемого потоку випромінювання від об'єкта

$$\begin{aligned} \Phi_{e\lambda}(\lambda) &= \int_{\Omega} J_{e\lambda}(\lambda, \alpha, \beta) d\Omega \approx \varepsilon(\lambda) \iint_{\Omega A_0} L_{e\lambda}^0(\lambda, T, x, y) \cos\beta dA d\Omega \approx \\ &\approx \varepsilon(\lambda) L_{e\lambda}^0(\lambda, T) A_0 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \cos\beta \sin\beta d\alpha d\beta = \pi \varepsilon(\lambda) L_{e\lambda}^0(\lambda, T) A_0 \sin^2 \sigma_A. \end{aligned} \quad (1.16)$$

Для інтегральної оцінки потоку випромінювання реальних тіл зручно використовувати поняття радіаційної температури T_r , яка визначається як температура АЧТ, при якій інтегральна світимість реального випромінювача в заданому спектральному інтервалі дорівнює інтегральній світимості випромінювання АЧТ з температурою T_r у тому спектральному інтервалі, тобто

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) M_{e\lambda}^0(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda}^0(\lambda, T_r) d\lambda. \quad (1.17)$$

Якщо $\varepsilon(\lambda, T) \cong \varepsilon(\lambda)$, то для інтервалу довжин хвиль $\Delta\lambda = 0 \dots \infty$ на основі закону Стефана-Больцмана отримаємо такий вираз для радіаційної температури

$$T_r = \sqrt[4]{\varepsilon(T)T}. \quad (1.18)$$

1.5 Поширення теплового випромінювання у атмосфері

При проходженні оптичного випромінювання через атмосферу воно послаблюється через молекулярне поглинання та розсіювання, а також розсіювання на аерозолях.

Найбільший вплив на ослаблення випромінювання в ІЧ діапазоні має молекулярне поглинання та розсіювання на трьохатомних молекулах таких, як вода, вуглекислий газ та озон. Смуги поглинання водяної пари з центром 6.3 мкм та вуглекислого газу з центрами 2.7 та 15 мкм обмежують пропускання в діапазоні довжин хвиль 2-20 мкм, визначаючи положення двох вікон прозорості: 3,5-5 та 8-14 мкм.

Для більшості застосувань тепловізійних систем вікно прозорості в діапазоні довжин хвиль 8-14 мкм є більш кращим.

Відповідно до закону Бугера спектральний коефіцієнт пропускання визначається за формулою

$$\tau_a(\lambda) = \exp[-\gamma(\lambda)L_d], \quad (1.19)$$

де $\gamma(\lambda) = \sigma(\lambda) + k(\lambda)$ – показник ослаблення;

$\sigma(\lambda) = \sigma_m(\lambda) + \sigma_a(\lambda)$ – показник розсіювання;

$k(\lambda) = k_m(\lambda) + k_a(\lambda)$ – показник молекулярного та аерозольного поглинання.

Детально методика розрахунку коефіцієнта пропускання атмосфери викладена в [1,2,3].

1.6 Модель тепловізійного каналу

При розв'язанні задач проектування та моделювання в інженерній та науковій практиці широко використовують методи математичного моделювання. Суть цих методів полягає в абстрагуванні від реального об'єкта та оперування з його чином, адекватно що відбивають які цікавлять проєктанта якості цього справжнього об'єкта. В формалізованому вигляді ці властивості описують математичними символами, відображеннями та операторами. При модельному описі об'єктів проектування, у тому числі й тепловізійних приладів існує певна ієрархія.

Найвищим ієрархічним рівнем є функціонально-логічний, на якому розглядається прилад у складі деякого комплексу програмно-апаратних засобів, що виконують певне завдання. На цьому рівні синтезується загальний алгоритм функціонування, включаючи обробку сигналів для виділення корисної інформації, а також алгоритми управління та вимоги до окремих підсистем комплексу.

Наступним рівнем проектування є системотехнічний, на якому ставляться і вирішуються завдання проектування кожної з підсистем комплексу. На системотехнічному рівні кожна з підсистем виконує певну функцію представляється у вигляді структурної схеми, що складається з елементів приблизно однакового ступеня складності з погляду математичних операторів, що описують перетворення сигналу кожним із цих елементів.

Узагальнена схема тепловізійного каналу на системотехнічному рівні представлена на рис.1.3.

На системотехнічному рівні синтезується структурна схема тепловізійного каналу, як об'єкта проектування, та в процесі вирішення завдань аналізу та параметричної оптимізації на основі прийнятого модельного опису визначаються значення змінних проектування – конструктивні параметри. Результати на даному рівні проектування дозволяють сформулювати ТЗ для проектування на наступному

схемотехнічному рівні окремо оптичної системи, модулятора, електронної частини, демодулятора та виконавчого устрою.

Модельний опис кожної з перелічених ланок ОЕП представляється в вигляді принципових схем з відповідним математичним описом функціонування елементів та схем в цілому. Як і на будь-якому з ієрархічних рівнів, на схемотехнічному рівні ставляться і вирішуються завдання синтезу, аналізу та параметричної оптимізації. Результатом проектування є конкретна принципова схема з певними конструктивними параметрами її елементів.

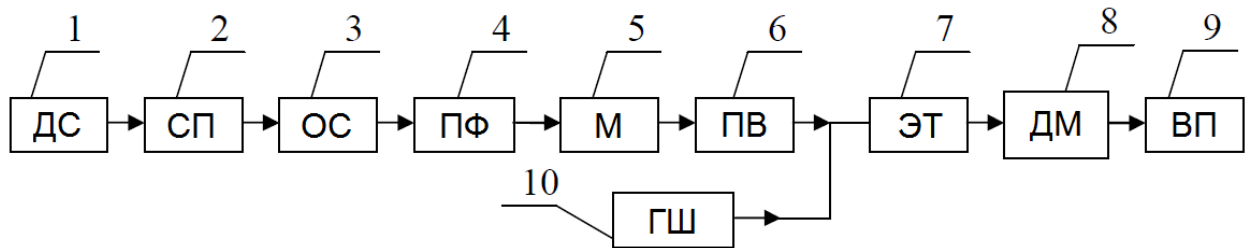


Рисунок 1.3 – Узагальнена схема тепловізійного каналу на системотехнічному рівні (1 – джерело сигналу; 2 – шар простору; 3 – оптична система; 4 – просторовий фільтр; 5 – модулятор; 6 – приймач випромінювання; 7 – електронний тракт; 8 – демодулятор; 9 – виконавчий пристрій; 10 – генератор шуму)

Розглянемо особливості моделі тепловізійного каналу.

1.7 Математичні моделі джерел сигналів

Джерелами сигналів для тепловізійних систем є об'єкти, які потрібно виявити та розпізнати. Але об'єкти завжди спостерігаються на будь-якому фоні. Тому необхідно сформулювати не тільки математичні моделі корисних сигналів – сигналів від об'єктів, але також математичні моделі фонових сигналів завад.

1.7.1 Математичні моделі сигналів від об'єктів

Зробимо ряд припущень, що дозволяють спростити математичні вирази, які описують сигнали від об'єктів:

– сигнали від об'єктів описуються, як збільшення значень їх яскравості щодо математичного очікування значень яскравості фону, що рівносильно опису об'єктів, що спостерігаються на рівномірному фоні;

– об'єкти та фон є сірими тепловими випромінювачами та, відповідно, розподілом температури $T_o(x, y)$ по поверхні об'єкта та середнім значенням температури фону \bar{T}_ϕ ;

– різниця температури об'єкта та фону невелика, тобто

$$\max |T_o(x, y) - T_\phi| \ll \bar{T}_\phi. \quad (1.20)$$

Корисний сигнал від об'єктів можна визначити як збільшення просторового розподілу спектральної яскравості поверхні об'єкта та спектральної яскравості рівномірного фону (рис. 1.4), тобто

$$\Delta L_\lambda(x, y, \lambda) = \varepsilon \{L_\lambda^o[\lambda, T_o(x, y)] - L_\lambda^o(\lambda, \bar{T}_\phi)\}. \quad (1.21)$$

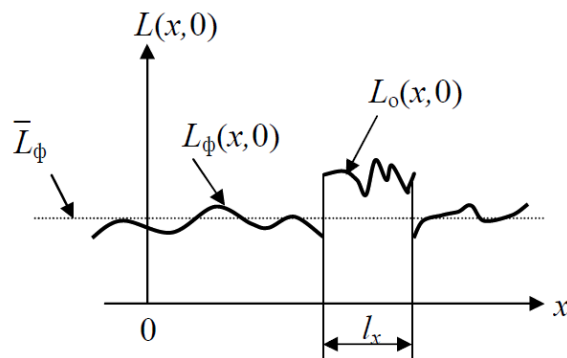


Рисунок 1.4 – Модельний опис джерел оптичних сигналів

Якщо у виразі (1.21) з урахуванням припущення (1.20) перший член у фігурних дужках розкласти в ряд Тейлора і обмежитися першими двома членами, то корисний сигнал від об'єктів можна представити так

$$\Delta L_{\lambda}(x, y, \lambda) = \varepsilon \frac{\partial L_{\lambda}^o(\lambda, T)}{\partial T} \bigg|_{T=\bar{T}_{\Phi}} \Delta T(x, y) = \Delta L_{\lambda}(\lambda) L_{\text{H}}(x, y), \quad (1.22)$$

причому

$$\Delta L_{\lambda}(\lambda) = \varepsilon \frac{\partial L_{\lambda}^o(\lambda, T)}{\partial T} \bigg|_{T=\bar{T}_{\Phi}} \Delta T_M, \quad (1.23)$$

$$L_{\text{H}}(x, y) = \Delta T(x, y) / \Delta T_M. \quad (1.24)$$

Залежно від просторового розподілу приросту $\Delta T(x, y)$ температури відрізняють такі типи моделей сигналів від об'єктів:

1. Об'єкт протяжний, рівномірний і не вписується в поле зору тепловізора (напівплощина). Тоді

$$\Delta L_{\lambda}(x, y, \lambda) = \Delta L_{\lambda}(\lambda) Y(x - x_0), \quad (1.25)$$

де x_0 – координата межі напівплощини, що описується функцією Хевісайда.

Просторово-частотний спектр такого об'єкта визначається як

$$\Delta \tilde{L}_{\lambda}(v_x, v_y, \lambda) = \Delta L_{\lambda}(\lambda) \cdot \frac{1}{2} \left[\delta(v_x, v_y) + \frac{1}{\pi v_x} \right] \exp(-j2\pi v_x x_0). \quad (1.26)$$

2. Об'єкт малорозмірний, "крапковий". Тоді

$$\Delta L_{\lambda}(x, y, \lambda) = A_0 \cdot \Delta L_{\lambda}(\lambda) \cdot \delta(x - x_0, y - y_0) = \Delta J_{\lambda}(\lambda) \cdot \delta(x - x_0, y - y_0), \quad (1.27)$$

де A_0 – площа об'єкту;

x_0, y_0 – координати об'єкту;

ΔT – усереднений за площею об'єкта температурний перепад відносно температури фону.

Просторово-частотний спектр такого об'єкта дорівнює

$$\Delta\tilde{L}_\lambda(v_x, v_y, \lambda) = \Delta L_\lambda(\lambda) \cdot 1(v_x, v_y). \quad (1.28)$$

3. Об'єкт у вигляді обмеженого за розмірами l_x, l_y прямокутника з рівномірним просторовим розподілом, а саме

$$\Delta L_\lambda(x, y, \lambda) = \Delta L_\lambda(\lambda) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right), \quad (1.29)$$

Просторово-частотний спектр такого об'єкта дорівнює

$$\Delta\tilde{L}_\lambda(v_x, v_y, \lambda) = \Delta L_\lambda(\lambda) \cdot \text{sinc}(\pi l_x v_x) \text{sinc}(\pi l_y v_y), \quad (1.30)$$

4. Об'єкт, обмежений за розмірами з довільним просторовим розподілом яскравості (рис.1.5).

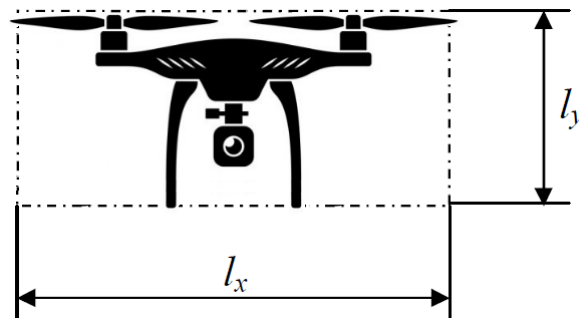


Рисунок 1.5 – Дрон як приклад об'єкта з обмеженими розмірами

Щоб спростити та уніфікувати опис об'єктів із довільним розподілом яскравості, скористаємося теоремою Котельникова для частотної області. Двовимірний Фур'є-спектр сигналу $\Delta L_\lambda(x, y, \lambda)$, обмеженого в межах прямокутної області $\text{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right)$, можна представити інтерполяційним поліномом виду

$$\Delta\tilde{L}_\lambda(v_x, v_y, \lambda) = \Delta L_\lambda(\lambda) \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \tilde{L}_H\left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}\right) \cdot \sin c\left[\pi l_x\left(v_x - \frac{m}{l_x}\right)\right] \sin c\left[\pi l_y\left(v_y - \frac{n}{l_y}\right)\right]. \quad (1.31)$$

Якщо обчислити зворотнє перетворення Фур'є від виразу (1.31), то отримаємо наступний вираз, що описує сигнал від об'єкта, з довільним розподілом яскравості та обмеженого за своїми розмірами

$$\Delta L_\lambda(x, y, \lambda) = \frac{\Delta L_\lambda(\lambda)}{A_0} \cdot \sum_{m,n=-\infty}^{\infty} \left| \tilde{L}_H\left(\frac{m}{l_x}, \frac{n}{l_y}\right) \right| \operatorname{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right) \exp\left\{j\left[2\pi\left(\frac{xm}{l_x}, \frac{yn}{l_y}\right) + \varphi\left(\frac{xm}{l_x}, \frac{yn}{l_y}\right)\right]\right\}. \quad (1.32)$$

З отриманого виразу випливає, що сигнал будь-якого фінітного об'єкта, тобто обмеженого по області його ненульового опису, можна подати у вигляді розкладання в базисі гармонійних функцій, обмежених у межах цієї ж області. Можливість такого представлення є наслідком надмірності континуального опису сигналів від реальних об'єктів.

1.7.2 Математичні моделі фонових утворень

Реалізації фонових сигналів є випадковими полями, які описуються в термінах яскравості випромінювання багатовимірними випадковими функціями $L_\Phi(\vec{r})$, визначеними в загальному випадку, в координатному просторі $\vec{r} = (r_1, r_2, \dots, r_k)^T$.

Очевидно, що фонові поля можуть суттєво відрізнятися за своїми статистичними характеристикам розподілу яскравості випромінювання, як, наприклад, фон, утворений зоряним небом, та аероландшафт при підстилаючій лісовій місцевості. Тим не менш, множина $B = \{b_i\}$ фонових полів можна розділити на підмножини $\Phi_k \in B$ таким чином, що будь-яку реалізацію $L_{\Phi_i}(\vec{r})$ фонових полів можна віднести до певного ансамблю

випадкових полів $\Phi_k = \{L_{\Phi_i}(\vec{r})\}$, кожен з яких повністю характеризується деякою багатовимірною щільністю ймовірності $w_{nk}(L_{\Phi_1}, \dots, L_{\Phi_n}; \vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n)$.

Тоді математичну модель фону як джерела оптичного сигналу можна представити у вигляді множини $A_\Phi = \{\Phi_k \in B : \rightarrow w_{nk}(L_{\Phi_1}, \dots, L_{\Phi_n}; \vec{r}_1, \dots, \vec{r}_n)\}$, що описує сигнали типових ансамблів фону.

Опис реально існуючих фонових полів у такому вигляді за умови, що їх реалізації є функціями багатьох аргументів, а розмірність n щільності ймовірності нічим не обмежена, пов'язана з практично непереборними труднощами. Тому зазвичай роблять ряд припущень, які суттєво спрощують проблему математичного моделювання фонових полів.

По-перше, будемо розглядати фонові поля як статичні, нехтуючи можливою залежністю розподілу яскравості в реалізаціях фону від часу, і ламбертовські, тобто які мають однакову яскравість за напрямками розповсюдження випромінювання. За таких припущень реалізації фонових полів описуються функціями трьох змінних $L_{\Phi_i}(x, y, \lambda)$. У деяких окремих випадках, які будуть розглянуті нижче, $L_{\Phi_i}(x, y, \lambda)$ можна представити як функції з роздільними змінними. Подання флуктуацій яскравості фону в такому вигляді значно спрощує завдання математичного моделювання фонових полів. Але, на жаль, таке припущення не завжди виправдане.

По-друге, фонові утворення можна розділити на ряд типових випадкових полів, які з деяким ступенем наближення мають такі властивості найбільш вивчених випадкових процесів, як гауссівські та марківські. Зручність такого опису полягає в тому, що n -мірні щільності ймовірності для цих випадкових процесів виражаються через двовимірні густини ймовірності.

По-третє, приймається припущення про те, що фонові утворення однорідними у сенсі випадковими полями, тобто їх математичні сподівання не залежать від координат, а коваріаційна функція залежить тільки різниці аргументів.

Тоді випадкові фонові поля, як і сигнали від об'єктів, зручно розглядати у вигляді флуктуацій яскравості випромінювання відносно значення математичного очікування, тобто

$$\Delta L_{\Phi}(\vec{r}) = L_{\Phi}(\vec{r}) - M\{L_{\Phi}(\vec{r})\} = L_{\Phi}(\vec{r}) - \bar{L}_{\Phi}(\vec{r}), \quad (1.33)$$

причому

$$\bar{L}_{\Phi}(\vec{r}) = \varepsilon L^0(\lambda, \bar{T}_{\Phi}). \quad (1.34)$$

Важливо відзначити, що при такому припущенні можна будувати математичні моделі фону в кореляційній теорії. Відповідно до цієї теорії повний опис випадкових полів задається їх математичним сподіванням іковаріаційною функцією. Кореляційна теорія суворо справедлива однорідних гаусівських та марківських випадкових процесів та полів, багатовимірні щільності ймовірності яких виражаються через двовимірні.

Незважаючи на обмеженість застосування кореляційної теорії, більшості практично цікавих випадків математичне моделювання фонових утворень здійснюють на основі цієї теорії. Головним чином, це виправдовується обмеженістю можливостей отримання експериментальних даних про багатовимірну статистику фону, у зв'язку з чим, доцільно екстраполювати закон розподілу на основі експериментально отриманої кореляційної функції та як перший наближення користуватися нормальним законом.

Розглянемо тепер математичні моделі типових фонових утворень при зроблених вище припущеннях.

Нехай для фону, крім перерахованих вище, справедливі наближення теплового джерела. До цього типу фонових утворень можна віднести розподіл яскравості випромінювання сільських, міських та ін. ландшафтів у середньому та далекому ІЧ діапазонах довжин хвиль. Тоді розподіл флуктуацій яскравості фону обумовлено флуктуаціями просторового

розподілу температури цього фону. Якщо амплітуди температурних флуктуацій невеликі по відношенню до середнього рівню температури фону \bar{T}_Φ без істотної втрати точності сигнали, що описують флуктуації яскравості фону, можна уявити, функціями з роздільними змінними, а саме,

$$\Delta L_{\Phi\lambda}(x, y, \lambda) = \Delta L_{\Phi\lambda}(\lambda) L_H(x, y), \quad (1.35)$$

$$\text{де } \Delta L_{\Phi\lambda}(\lambda) = \varepsilon \Delta T_M \left. \frac{\partial L_\lambda^0(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi} - \text{функція, що описує спектральний}$$

розподіл яскравості флуктуацій фону;

$L_H(x, y) = \Delta T(x, y) / \Delta T_M$ – нормована функція, що описує розподіл просторових флуктуацій яскравості, обумовлених флуктуаціями просторового розподілу температури $\Delta T(x, y) = T(x, y) - \bar{T}_\Phi$.

Як впливає з аналізу формули (1.35), залежність флуктуацій яскравості теплового фону від довжини хвилі λ носить регулярний характер і, в першому наближенні, визначається функцією контрастної яскравості

$$\frac{\partial L_\lambda^0(\lambda, T)}{\partial T} \text{ при заданому значенні середньої температури фону } \bar{T}_\Phi, \text{ а також}$$

величиною флуктуацій температурного перепаду ΔT_M . Тому статистичні властивості флуктуацій амплітуди спектральної яскравості теплового фону можна описати одновимірною щільністю ймовірності $w_L(\Delta L, \lambda)$, вид якої залежить від щільності ймовірності значень флуктуацій температури $w_T(\Delta T)$. Якщо флуктуації температури ΔT розподілені за гаусівським законом, то одновимірна щільність імовірності амплітуди спектральної яскравості також гаусівська і має вигляд

$$w_L(\Delta L, \lambda) = \frac{1}{\sigma_\lambda \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\Delta L^2}{2\sigma_\lambda^2}\right), \quad (1.36)$$

де σ_λ – середньоквадратичне відхилення флуктуацій спектральної яскравості фону на довжині хвилі λ .

Тоді в рамках кореляційної теорії просторово-спектральні флуктуації теплового фону можна описати кореляційною функцією у вигляді

$$K(\Delta x, \Delta y, \lambda) = \sigma_\lambda^2 K_H(\Delta x, \Delta y), \quad (1.37)$$

де $K_H(\Delta x, \Delta y)$ – нормована кореляційна функція просторового розподілу випадкового стаціонарного поля яскравості фону.

Для гаусівського закону розподілу флуктуацій температури, середньоквадратичне відхилення флуктуацій яскравості дорівнює

$$\sigma_\lambda = \varepsilon \frac{T_{\max} - T_{\min}}{6} \left. \frac{\partial L_\lambda^o(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi}, \quad (1.38)$$

а для бінарного закону

$$\sigma_\lambda = \varepsilon \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \left. \frac{\partial L_\lambda^o(\lambda, T)}{\partial T} \right|_{T=\bar{T}_\Phi}. \quad (1.39)$$

Слід зазначити, що бінарний закон досить добре описує розподіл значення яскравості для такого типу фону, як хмарне небо. При цьому нормована кореляційна функція може бути апроксимована залежністю виду

$$K_H(\Delta\phi) = \exp(-a |\Delta\phi|). \quad (1.40)$$

На закінчення відзначимо, що модель фонових утворень використовується у задачах оцінки ефективності тепловізійних систем при селекції та розпізнаванні об'єкти на нерівномірному фоні. Це складне і до кінця не вирішене завдання, вимагає знання теорії статистичних рішень, а також теорії зорового сприйняття складних текстур.

1.8 Висновки по розділу 1

В задачах тепловізійного виявлення, розпізнавання і ідентифікації малих дронів доцільно застосовувати матричні тепловізори без оптико-механічного сканування (FLIR – Forward Looking Infrared) [15-20]. Це пов'язано з тим, що дрони є рухомими, іноді – швидкорухомими, об'єктами.

Застосування тепловізорів типу FLIR дає можливість отримати високе просторове розрізнення (зображення до 1920 x 1080 і навіть вище), високу частоту кадрів (25 к/с і вище) [15-20].

Чутливість сучасних тепловізорів дуже висока, вони можуть розрізняти мінімальний температурний контраст $\Delta T = 50$ мК [15-20]. Головним обмеженням для виявлення, розпізнавання і ідентифікації об'єктів в тепловізійному каналі є теплові завади у вигляді фонових сигналів.

Тепловізійний канал слід розглядати як один з каналів у комплексованій системі виявлення, розпізнавання, ідентифікації дронів. В такій системі [21] застосовують радіолокаційні [22], радіочастотні [23], акустичні [24-27] і оптико-електронні [28-32] методи.

На кафедрі МІРЕС ХНУРЕ виконуються дослідження з обробки оптичних, інфрачервоних, акустичних і радіолокаційних сигналів та їх комплексування для виявлення дронів, визначення їх координат та параметрів руху. Дослідження в магістерській кваліфікаційній роботі відповідають зазначеному науковому напрямку і доповнюють дослідження викладачів кафедри.

2 ОЦІНКА ПОТЕНЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ДРОНІВ У ТЕПЛОВІЗІЙНОМУ КАНАЛІ

2.1 Вибір критерію ефективності тепловізійного каналу спостереження

Основне призначення систем спостереження – виявлення та ідентифікація об'єктів у контрольній області. Критерії ефективності систем спостереження, відповідно, повинні відображати їхню здатність виявляти та ідентифікувати цілі в реальних умовах за існуючих об'єктивних обмежень.

У цьому розділі розглядається можливість застосування найбільш поширеного критерію оцінки ефективності оптико-електронних систем спостереження (ОЕС) – критерію Джонсона – до тепловізійного каналу спостереження дронів, аналізуються особливості його практичного застосування, недоліки та адаптації до реальних умов використання тепловізійного каналу.

Крім теоретичного аналізу проблеми з літературних джерел наводяться розрахункові та експериментальні дані щодо оцінки можливості виявлення та ідентифікації дронів за допомогою тепловізійних систем за різних зовнішніх умов.

За результатами теоретичного та експериментального аналізу даної проблеми робиться висновок про обмежену застосовність критерію Джонсона у чистому вигляді для оцінки та прогнозування ефективності ОЕС у реальних умовах та необхідності введення до розрахунку характеристик виявлення тепловізійного каналу коефіцієнтів, що відображають вплив заважаючих факторів.

2.1.1 Критерій Джонсона

Вперше задача чисельної оцінки розрізнення об'єктів, що спостерігаються із застосуванням оптико-електронних засобів було вирішено Дж. Джонсоном (John Johnson) – співробітником науково-дослідної

лабораторії армії США 1958 року. У ході експериментів було визначено значення роздільної здатності, необхідні для розрізнення зображень об'єктів, що спостерігаються застосуванням приладів нічного бачення (ПНБ) на основі електронно-оптичних перетворювачів (ЕОП). Вибраним чотирма рівнями сприйняття (розрізнення) у порядку підвищення інформативності – виявлення, орієнтація, розпізнавання, ідентифікація – поставлені мінімально необхідні значення розрізнення, зазначені в парах ліній, що укладаються на критичний (найменший) розмір об'єкту (рис. 2.1) [33].

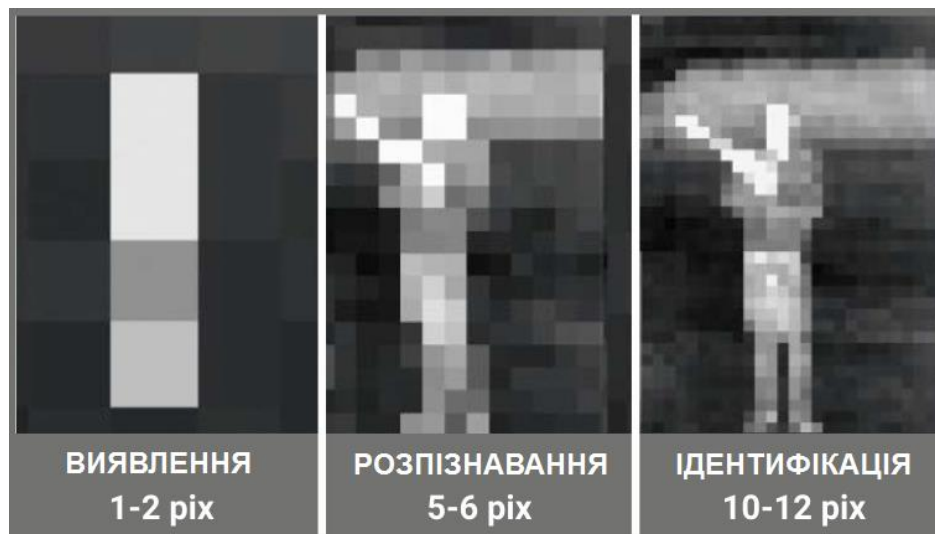


Рисунок 2.1 – Визначення необхідного розрізнення на критичний розмір об'єкту

Незалежно від типу об'єкту із використаного набору моделей необхідне порогове розрізнення виявилось практично однаковим з розкидом, що не перевищував $\pm 25\%$ від середнього значення. Цей критерій також застосовується для оптико-електронних засобів із вихідним відеосигналом – відео- та фото-камер, тепловізорів, з тією відмінністю, що замість пар ліній штрихової світи значення вказуються в телевізійних лініях (ТВЛ) або в елементах зображення (пікселях). Пара ліній штрихової міри в експериментах Джонсона, як міра найменшого помітного просторового періоду, дорівнює двом телевізійним лініям та відповідні значення рівнів

розрізнення будуть у телевізійних лініях мати значення 2,0; 2,8; 8,0; 12,8 ТВЛ відповідно. Отримані значення представлені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Критерій Джонсона

Рівень розрізнення	Розрізнення на мінімальний розмір N_{50}	
	пар ліній ЕОП	ТВЛ
Виявлення	$1,0 \pm 0,25$	$2,0 \pm 0,5$
Орієнтація	$1,4 \pm 0,35$	$2,8 \pm 0,7$
Розпізнавання	$4,0 \pm 0,8$	$8,0 \pm 1,6$
Ідентифікація	$6,4 \pm 1,5$	$12,8 \pm 3$

Джонсон у своїй роботі виділив 4 рівні розрізнення – виявлення, орієнтація, розпізнавання, ідентифікація. Сам Джонсон ніяк формально не визначив ці поняття, це зробив згодом Lucien Viberman [34] (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Визначення рівнів розрізнення

Рівень розрізнення	Опис
Виявлення	Об'єкт присутній.
Орієнтація	Розрізняється симетричність чи асиметричність об'єкта та його орієнтація – вертикальна або горизонтальна.
Розпізнавання	Визначається клас об'єкта – будинок, людина, автомобіль і т.д.
Ідентифікація	Об'єкт може бути описаний у межах знань спостерігача. тип будівлі (будинок, гараж, склад), тип автомобіля (вантажівка, легковий, пікап), що за людина (чоловік/жінка, військовий/цивільний).

Існують і більш детальні класифікації, ймовірно затребувана в деяких дослідних цілях, присвячених особливостям сприйняття візуальної інформації спостерігачем, але в нашому випадку вони є надмірними, бо в кваліфікаційній роботі йдеться про оцінку характеристик тепловізійного каналу.

Для нашого випадку достатньо двох ключових рівнів, що несуть якісно нову інформацію. Одним із них є перший рівень – виявлення об'єкта в зоні спостереження. Другим показником доцільно використати показник

ідентифікації, оскільки саме він характеризує поріг можливості визначення типу рухомого повітряного об'єкту, природне чи штучне його походження, критичні для прийняття рішення про особливості виявленого об'єкта.

Говорячи про виявлення об'єкту, зазвичай, за умовчанням мається на увазі граничне значення сигналу при якому ймовірність вірного прийняття рішення про наявність цілі оператором або нейронною мережею становить 50%, як це було в експерименті Джонсона. Тобто, за наявності об'єкту відношення випадків виявлення та пропуску цілі становить 1:1.

Для підвищення ймовірності виявлення необхідно за тих же умов підвищувати помітність сигналу. Для визначення необхідного розрізнення, що забезпечує інше значення ймовірності, використовують відповідний коефіцієнт [35]. Значення коефіцієнта перерахунку необхідного розрізнення залежно від необхідної ймовірності розрізнення наведено у табл. 2.3, а графічне вираження – на рис. 2.2.

Таблиця 2.3 – Коефіцієнти перерахунку критерію Джонсона для різних значень ймовірності

Вірогідність	1,0	0,95	0,8	0,5	0,3	0,1	0,02
Коефіцієнт	3,0	2,0	1,5	1,0	0,75	0,5	0,25

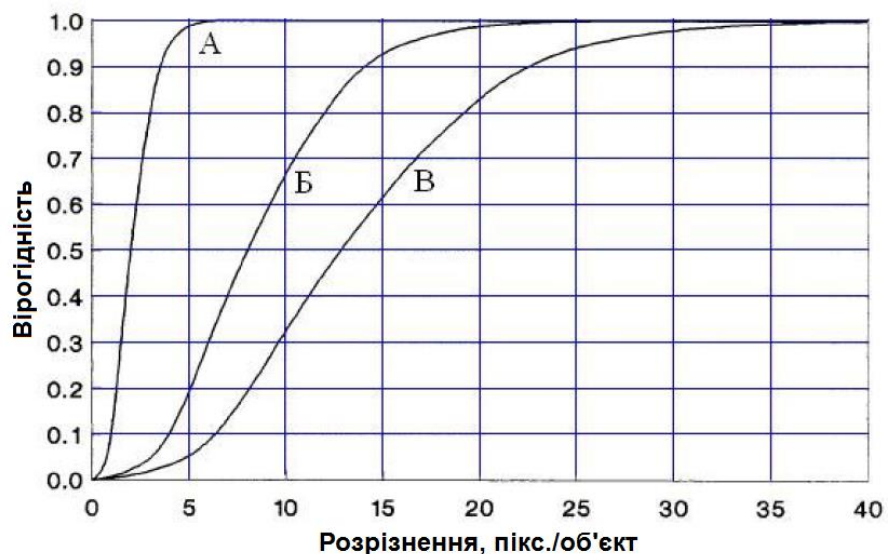


Рисунок 2.2 – Залежність ймовірності виявлення (А), розпізнавання (Б) та ідентифікації (В) об'єкта від розрізнення

2.1.2 Інші критерії розпізнавання об'єктів

Крім критерію Джонсона, що є найбільш універсальним і дуже поширеним критерієм розрізнення об'єктів при використанні оптико-електронного спостереження, існують інші, зазвичай вузько спеціалізовані критерії, які задаються окремими методичними вказівками та орієнтовані на певні типи апаратури та розв'язувані задачі.

МВС Великобританії у посібнику до застосування систем відеоспостереження встановлює критерій активної цілі у зоні спостереження, як зображення ростової фігури, розміром $1/10$ висоти кадру відео або 58 пікселів [36, 37]. З урахуванням пропорцій ростової фігури 1:3,5 це відповідає 16,5 пікселів на ширину об'єкту, що декілька більше критерію ідентифікації у термінах критерію Джонсона.

Програма випробувань пошукового тепловізора "Катран" включає перевірку значення дистанції розпізнавання людини, яка визначається як дистанцію на якій ростова фігура людини представляється як вертикально орієнтована прямокутна ціль із можливістю розрізнення двох положень рук: руки опущені вздовж корпусу і руки розведені убік перпендикулярно корпусу людини. Факт розпізнавання встановлюється дослідним шляхом з незалежно винесеного позитивного висновку про розрізнення об'єкту двома із трьох спостерігачів, які ведуть одночасне спостереження цілі.

Надалі в кваліфікаційній роботі розглядатиметься лише критерій Джонсона, як найбільш універсальний і добре опрацьований, у тому числі з точки зору впливу різних факторів, що впливають на можливість і ймовірність розрізнення об'єкту.

2.2 Фактори, які впливають на ефективність розпізнавання дронів в реальних умовах

Критерій Джонсона в чистому вигляді враховує лише одну характеристику – критичний розмір видимого профілю цілі.

Подібне спрощення, зроблене в ході лабораторних експериментів, неприйнятно, коли потрібна оцінка або передбачення поведінки спостережних систем у реальних умовах, оскільки ігнорується ряд параметрів, що належать до контрольованої області, самої цілі та спостерігача або автоматизованої системи спостереження [38, 39].

1. Контрольна область:

- розмір контрольної області;
- кількість, розмір, розподіл зон, у яких може бути ціль, у контрольній області;
- об'єкти в контрольній області: їх кількість, форма, яскравість та колірний контраст, чіткість, кількість помітних деталей і т.д.;
- розподіл об'єктів з контрольної області;
- зернистість, шум;
- загальний обсяг доступної інформації;
- середнє значення яскравості чи освітленості зображення;
- наявність попереднього орієнтовного цілевказання.

2. Об'єкт:

- розташування цілі на зображенні;
- розташування цілі у контрольній області;
- форма та профіль цілі;
- розмір, колір, чіткість, яскравість цілі.
- ступінь відокремлення від фону та інших об'єктів (контраст).

3. Спостерігач (система спостереження):

- тренованість (обсяг навчальної вибірки);
- досвід (донавчання нейронної мережі в процесі роботи);
- вроджені якості (тип застосованої нейронної мережі) ;
- компроміс між швидкістю пошуку та точністю.

В 1974 році науковці Джонсон і Лоусон (Lawson) переробили та доповнили початкову доповідь. У новій роботі було перевірено та загалом підтверджено виконання критерію для цілей із великим відношенням

короткої та довгої сторін типу кораблів та літаків. Перелік рівнів розрізнення доповнився поняттям «класифікація» як віднесення цілі до великої групи об'єктів типу гусеничні (а не колісні) транспортні засоби, якому відповідало розрізнення 2,5 пар ліній, а критерій розпізнавання знизився з 4 до 3 пар ліній [40].

Як головний фактор розпізнавання/ідентифікації об'єкта було вказано можливість розрізнення критичних особливостей форми профілю цілі зображення. Чим більше деталей вдається розрізнити на зображенні, тим більша ймовірність ідентифікації об'єкта.

Роком раніше Rosell і Willson [41, 42] у дослідженні зі сприйняття фотографічних зображень транспортних засобів встановили, що для розпізнавання об'єкта необхідно розрізнення характерних деталей, властивих даному класу цілей. Також ними було встановлено, що потрібна величина деталізації становить 1/8 від мінімальної ширини зображення, а для ідентифікації потрібна деталізація об'єкта 1/13 мінімальної ширини. Ці цифри практично збігаються з критерієм Джонсона, який вимагає 8 ТВ-ліній для розпізнавання та 12,8 для ідентифікації.

В умовах нерівномірного фону факт виявлення цілі вже включає себе певний рівень її розпізнавання, необхідний для розрізнення цілі від артефактів зображення. Тобто, при нерівномірному фоні та наявності шумів для встановлення факту виявлення об'єкта потрібно більше розрізнення, ніж при рівномірному фоні [43, 44].

Для врахування впливу нерівномірності фону на можливість виявлення об'єкта розраховується узагальнена характеристика нерівномірності зображення, що враховує яскравісні та просторові характеристики артефактів зображення [45]:

$$Clutter = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i^2}{N}}, \quad (2.1)$$

де σ_i – стандартне відхилення яскравості i -го пікселя;

N – кількість суміжних пікселів в області, визначеній як квадрат зі стороною рівною двом критичним розмірам цілі.

Формула (2.1) дає великі значення нерівномірності (*Clutter*) для суб'єктивно більш складних та нерівномірних сцен. Тут враховується яскравість артефактів фону, їх просторові характеристики та схожість розмірів із розміром цілі, що відповідає інтуїтивному уявленню про складність виділення цілі серед артефактів схожих розмірів і добре узгоджується з експериментальними даними [46].

Для трьох рівнів нерівномірності фону за значенням відношення сигнал/нерівномірність (SCR – signal to clutter ratio):

- рівномірний (SCR>10),
- середньої нерівномірності (1<SCR<10),
- високої нерівномірності (SCR<1)

та різних значень ймовірності виявлення об'єкта необхідна роздільна здатність у парах ліній на критичний розмір складатиме значення представлені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Критерій виявлення у різних умовах нерівномірності фону

Ймовірність виявлення	Нерівномірність		
	низька (SCR>10)	середня (1<SCR<10)	висока (SCR<1)
1,0	1,7	2,8	-
0,95	1,0	1,9	-
0,9	0,9	1,7	7,0
0,8	0,75	1,3	5,0
0,5	0,5	1,0	2,5

З цих даних видно, що потрібне розрізнення для забезпечення 50%-ної ймовірності виявлення цілі в залежності від властивостей фону змінюється в 5 разів – від 0,5 до 2,5 пар ліній на найменший розмір цілі. Для 90%-ної

ймовірності вимоги до роздільної здатності змінюються майже на порядок. Більш високої ймовірності виявлення цілі в умовах сильно нерівномірного фону досягти взагалі виявилось неможливо.

Перелік інших факторів впливу і ступінь їх впливу на значення роздільної здатності, необхідної для розрізнення цілі представлені табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Вплив різних факторів на потрібну для розрізнення цілі роздільну здатність

Впливаючий фактор	Відхилення результатів
Середнє відхилення однієї цілі	25%
Тип цілі (клас об'єкта) для малих цілей (при $L/W < 2$)	25%
Тип цілі (клас об'єкта) для протяжних цілей (при $L/W > 2$) – бічна проекція цілі	30%
Тип цілі (клас об'єкта) для протяжних цілей (при $L/W > 2$) – фронтальна (задня) проекція цілі	55%
Нерівномірність фону – низька нерівномірність	50%
Нерівномірність фону – висока нерівномірність	250%
Характеристики цілі	200%
Характеристики спостерігача (низька тренуваність)	100%
Обмеження часу спостереження	250%

Таким чином, критерій Джонсона є зручним засобом оцінки параметрів засобу спостереження, що не відображає реальних тактичних можливостей даного засобу спостереження у реальних умовах.

Визначена на його основі параметр «дальність виявлення», часто наведений у характеристиках спостережних приладів, є інтерпретацією сукупності відомих характеристик оптико-електронних систем спостереження та цілі миттєвого поля зору одиничного елемента сенсора, який зазвичай визначається через фізичний розмір елемента та фокусну відстань об'єктива (рис.2.3) за формулою (2.2) або через повне поле зору та

формат сенсора за формулою (2.3) та розмірів фронтальної або бічної проекції цілі.

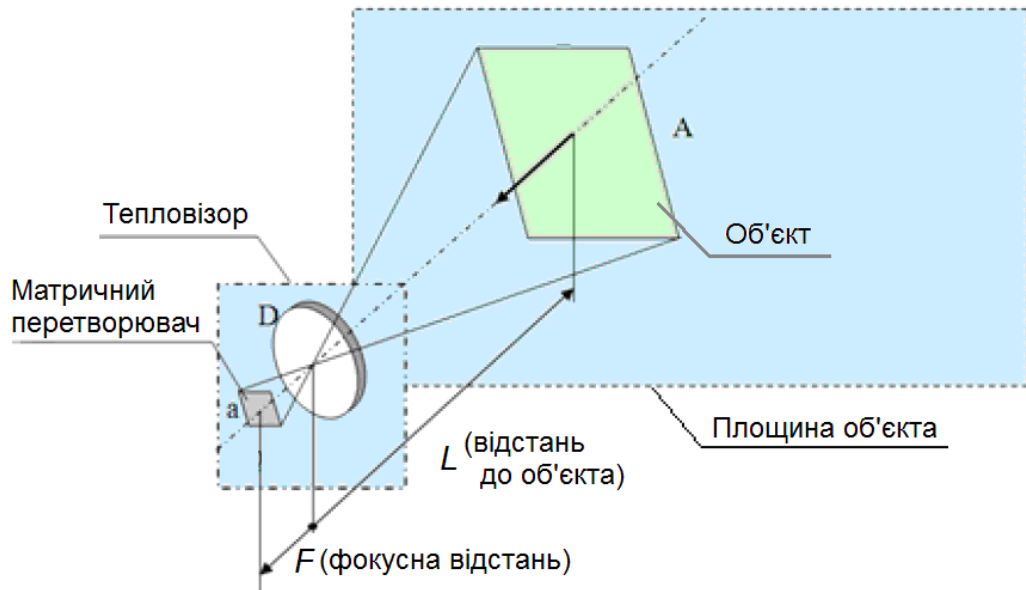


Рисунок 2.3 – Схема перетворення зображення об'єкта у тепловізорі з матричним сенсором

$$L = \frac{FW}{Na}, \quad (2.2)$$

де L – гранична дальність розрізнення,

F – фокусна відстань об'єктива,

W – критичний розмір цілі,

N – значення критерію Джонсона,

a – розмір одиничного елемента зображення (розмір пікселя сенсора).

$$L = \frac{W}{N \tan(\varphi/h)}, \quad (2.3)$$

де φ – поле зору сенсора по вертикалі (горизонталі),

h – кількість елементів сенсора по вертикалі (горизонталі).

Прогнозування ефективності тепловізійного каналу системи виявлення дронів у реальних умовах вимагає врахування таких факторів, як

характеристики виявленої цілі (контраст з фоном, форма, особливості контуру), характеристики фону (яскравість, рівномірність фону), погодні умови (хмарність, опади, запилення повітря), характеристики системи розпізнавання (глибина навчання нейронної мережі) та тактичні параметри (площа зони пошуку, час пошуку).

Врахування та нормування всіх цих факторів є складним завданням і найчастіше просто опускається, а для оцінки дальності дії спостережних систем використовується розрахунок на основі критерію Джонсона в чистому вигляді для ймовірності 50%, що призводить до сильно завищених очікувань щодо ефективності систем у реальних умовах.

Виходячи з аналізу даних, представлених у табл. 2.5, можна бачити, що найбільший негативний вплив на можливість виявлення та ідентифікації об'єкта надають такі фактори, як висока нерівномірність фону, варіабельність параметрів цілі, низька тренуваність спостерігача (навченість нейронної мережі) та обмеження часу спостереження [47]. Якщо виключити з розгляду характеристики спостерігача та тактичні обмеження часу спостереження, то залишаються два основні фактора, здатні знизити ймовірність виявлення цілі, нерівномірність фону та особливості цілі. Дослідити вплив цих двох факторів на ефективність виявлення і розпізнавання дронів можна експериментальним шляхом з використанням моделювання.

2.3 Оцінка виявної здатності тепловізійного каналу

Алгоритм, що застосовується для визначення дистанції та ймовірності виявлення цілі з використанням тепловізорів, включає наступні кроки[48]:

1. Визначається ефективна різниця температур цілі $T_{\text{ц}}$ та фону $T_{\text{ф}}$ та мінімальний розмір цілі h . Ефективна різниця температур $\Delta T = T_{\text{ц}} - T_{\text{ф}}$ являє собою видиму різницю, що реєструється системою спостереження враховуючи коефіцієнт випромінювання цілі та поглинання атмосферою.

2. Обчислюється мінімальна розрізнявана просторова частота ν системи спостереження, як функція різниці температур об'єкта та фону

$$\Delta T(\nu) = T_{\text{ц}}(\nu) - T_{\text{ф}}(\nu). \quad (2.4)$$

3. На підставі емпіричної залежності ймовірності розрізнення цілі від роздільної здатності на мінімальний розмір цілі за заданим значенням ймовірності визначається необхідна роздільна здатність.

4. Отримане значення необхідного розрізнення накладається на розрахункову залежність розрізнення від дистанції до цілі, цим визначається гранична дистанція розрізнення цілі.

Алгоритм визначення дистанції та ймовірності виявлення цілі з використанням тепловізорів показано на рис.2.4.

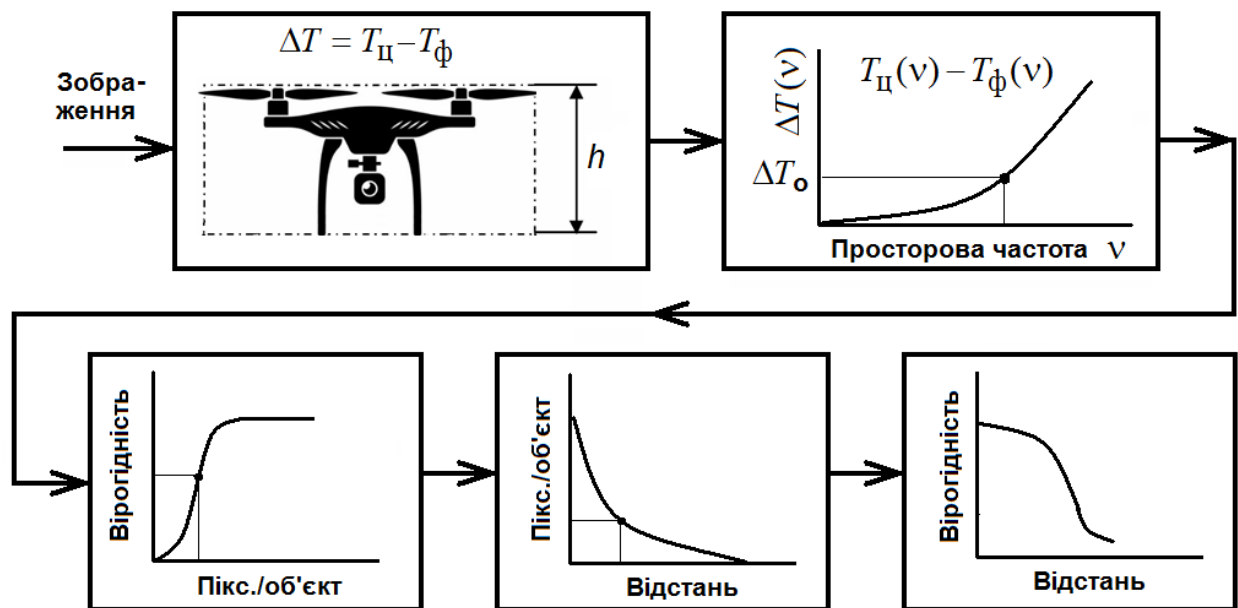


Рисунок 2.4 – Алгоритм визначення дистанції та ймовірності виявлення цілі з використанням тепловізорів

Тут слід відмітити ряд важливих моментів, які можна упустити з розгляду при визначенні характеристик виявлення тепловізійної системи з використанням цього алгоритму.

Теплова сигнатура об'єкта, зокрема дрона, сильно залежить від зовнішніх умов та стану самого об'єкта. Термограма дрону у спокої та в активному стані відрізняється через нагрівання двигуна, батареї, електроніки. Також термограма дрону, що рухається у вологу погоду буде іншою, ніж у суху через різне охолодження.

Слід враховувати принципово інший характер випромінювання дрону в довгохвильовій області порівняно з видимим діапазоном. У видимому і ближньому інфрачервоному діапазоні засоби спостереження реєструють вторинне випромінювання, що розсіюється поверхнею об'єкта, а в тепловому діапазоні – власне випромінювання об'єктів.

У видимому діапазоні відносна величина сигналу, що визначається різницею коефіцієнтів відбиття/поглинання цілі та фону, може приймати як позитивні, так і негативні величини та зазвичай ап'юрі є невідомою.

Власне випромінювання об'єктів у довгохвильовій інфрачервоній області, підкоряючись закону Стефана-Больцмана (1.11), залежить від власної температури об'єкта [1-3]. Оскільки у більшості випадків температура дрону вище за температуру фону, то можна точно сказати, що ціль буде мати позитивний контраст відносно фону. Моделі, що використовуються для оцінки виявної здатності тепловізійних систем, мають на увазі, що температура об'єкта на кілька градусів вище за температуру фону [1,3].

$$P = S\varepsilon\sigma T^4, \quad (2.5)$$

де P – потужність випромінювання;

S – площа поверхні об'єкта;

ε – коефіцієнт випромінювання поверхні;

σ – постійна, рівна $5,67 \cdot 10^{-8}$;

T – абсолютна температура об'єкта.

У разі рівномірного фону, для чого на практиці достатньо відсутності прямого сонячного випромінювання, тобто у похмуру погоду або у темний час доби, задача виявлення цілі зводиться до виявлення на зображенні зони із позитивним контрастом. Якщо температура об'єкта значно вища за температуру фону, то можливість його виявлення зберігається також при умови, що розмір зображення менший за один елемент сенсора, оскільки інтегральний потік випромінювання, що потрапляє на елемент, дає сигнал достатній для його виділення на фоні. Таке точкове виявлення сильно нагрітих предметів може виходити за межі дистанції, розрахованої на основі критерію Джонсона по суто геометричним параметрам.

В умовах рівномірного фону та високої різниці температур можливість виявлення визначатиметься не лише геометричними, а й значною мірою енергетичними характеристиками цілі, що дозволяє виявляти об'єкти на більшій дистанції, ніж передбачається по критерію. В умовах нерівномірного фону з урахуванням значної відмінності теплової сигнатури цілі від видимого силуету дистанція виявлення та ідентифікації буде навпаки менше, ніж передбачається за критерієм.

2.4 Розрахунок дистанцій виявлення, розрізнення і ідентифікації дронів

Граничні дальності виявлення, розрізнення і ідентифікації дронів для тепловізійного каналу, розраховані за 50% критерієм Джонсона наведено у табл. 2.6. Для розрахунку прийнято такі значення, що описують розміри дрону DJI Phantom 3 (рис.2.5): висота 0,33 м, ширина 0,33 м. Критичним розміром є ширина, для здійснення розрізнення цілі за тим чи іншим рівнем сприйняття на ній має укладатися відповідна кількість елементів зображення, вказаних Джонсоном. Розрахунок проводився за формулою (2.2).

Розрахунок проведено для найпоширеніших в даний час розмірів приймального елемента (пікселя) матричних сенсорів 25 мкм та 17 мкм та ряду стандартних фокусних відстаней об'єктивів 25, 50, 75, 100, 150 мм.



Рисунок 2.5 – Дрон DJI Phantom 3

Таблиця 2.6 – Розрахункові дальності виявлення (L_d), розпізнавання (L_r) та ідентифікації (L_i) дрона DJI Phantom 3

№	Параметри системи		Дальність, м		
	F, мм	a, мкм	L_d	L_r	L_i
1	25	25	168	81	23
2	50	25	337	161	46
3	75	25	505	242	68
4	100	25	673	323	91
5	150	25	1010	484	137
6	25	17	248	119	34
7	50	17	495	237	67
8	75	17	743	356	101
9	100	17	990	475	134
10	150	17	1486	712	201

На рис.2.6 показані оцифровані в системі MATLAB дані критерію Джонсона.

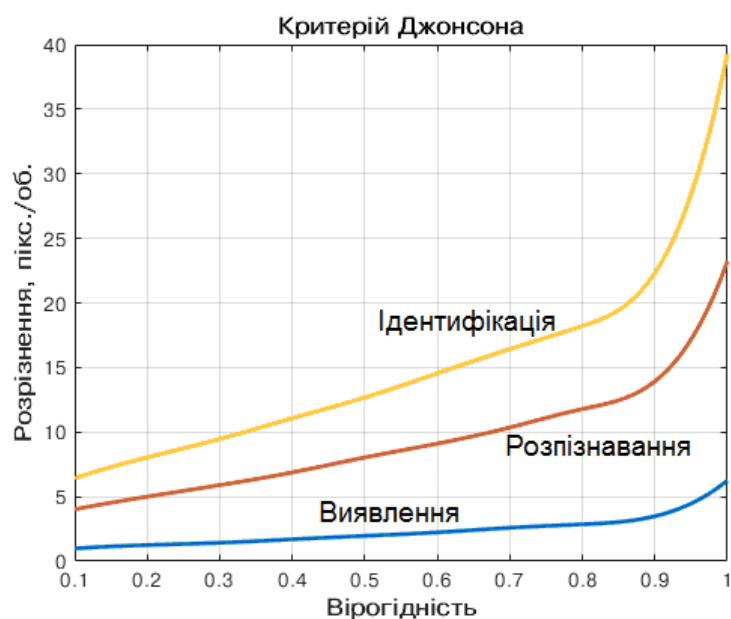


Рисунок 2.6 – Оцифровані в системі MATLAB дані критерію Джонсона

На підставі цих даних за формулою (2.2) розраховано графік характеристик виявлення дрону DJI Phantom 3 для фокусної відстані $F = 100$ мм і розміру елементу матриці $a = 17$ мкм (рис.2.7).

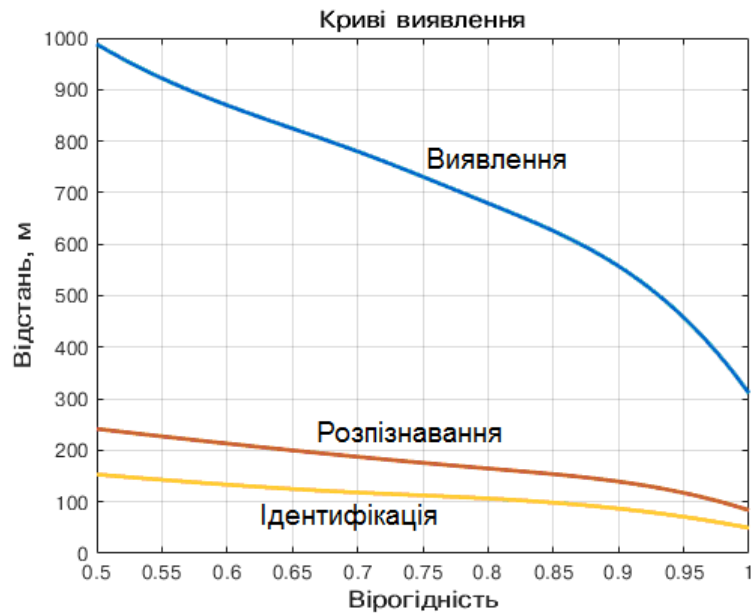


Рисунок 2.7 – Криві виявлення дрону DJI Phantom 3 для $F = 100$ мм і $a = 17$ мкм

Криві виявлення для інших значень фокусної відстані F і розміру елементу матриці a можна отримати, помноживши отримані графіки на коефіцієнт пропорційності

$$K = \frac{Fa_1}{F_1a}, \quad (2.6)$$

де $F_1 = 100$ мм і $a_1 = 17$ мкм.

Формула (2.6) враховує, що при збільшенні фокусної відстані об'єктиву і при зменшенні розміру елементу матриці кількість пікселів зображення дрону буде пропорційно збільшуватися.

2.5 Висновки по розділу 2

В результаті оцінки потенційних можливостей виявлення та розпізнавання дронів у тепловізійному каналі були розраховані дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації дрона DJI Phantom 3.

Серед заданого набору фокусних відстаней об'єктиву 25, 50, 75, 100, 150 мм і розміру елементу сенсора 17 і 25 мкм найменші дальності розраховані для $F = 25$ мм і $a = 25$ мкм:

- дальність виявлення 168 м;
- дальність розпізнавання 81 м;
- дальність ідентифікації 23 м.

Найбільші дальності розраховані для $F = 150$ мм і $a = 17$ мкм:

- дальність виявлення 1486 м;
- дальність розпізнавання 712 м;
- дальність ідентифікації 201 м.

Отримані криві виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону DJI Phantom 3. При збільшенні вірогідності з 0,5 до 0,9 відповідні дистанції збільшуються майже вдвічі, а до 0,95 – майже втричі.

Прогнозування ефективності тепловізійного каналу системи виявлення дронів у реальних умовах вимагає врахування таких факторів, як характеристики виявленої цілі (контраст з фоном, форма, особливості контуру), характеристики фону (яскравість, рівномірність фону). Розрахунок на основі критерію Джонсона в чистому вигляді для ймовірності 50%, очевидно, призведе до сильно завищених очікувань щодо ефективності систем у реальних умовах.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИЯВЛЕННЯ ДРОНІВ В ТЕПЛОВІЗІЙНОМУ КАНАЛІ

3.1 Постановка задачі

В попередньому розділі шляхом розрахунку за критерієм Джонсона отримані криві виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону DJI Phantom 3. Розрахунок на основі критерію Джонсона в чистому вигляді призведе до сильно завищених очікувань відносно ефективності тепловізійної системи у реальних умовах.

В реальних умовах для оцінки ефективності тепловізійного каналу системи виявлення дронів потрібно врахувати такі фактори, як

- характеристики об'єкту спостереження (контраст з фоном, форма, особливості контуру),
- характеристики фону (яскравість, рівномірність фону).

Оцінку впливу зазначених факторів пропонується врахувати у ході натурального і модельного експерименту.

1. Для врахування характеристик об'єкту спостереження слід отримати певну кількість його тепловізійних зображень з достатньо високим розрізненням в різних ракурсах, в різних режимах польоту. Точно так же слід отримати ряд тепловізійних зображень рухомих об'єктів, які не відносяться до класу дронів, наприклад – птахів. Це буде потрібно для дослідження процесу розпізнавання дронів від інших класів.

2. Для подальшого моделювання знаходження об'єкту на певній відстані слід пропорційно зменшувати 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 сенсора.

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

В розділі 1 показано, що бінарний закон досить добре описує розподіл значення яскравості для такого типу фону, як хмарне небо. При цьому нормована кореляційна функція може бути апроксимована залежністю виду

$$K_H(\Delta\varphi) = \exp(-a |\Delta\varphi|). \quad (3.2)$$

В результаті отримуємо потрібну кількість зображень об'єктів (дронів, птахів) 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.

4. Характеристики виявлення для рідних відношень сигнал-шум можна отримати методом експертних оцінок, демонструючи отриманий ансамбль зображень різним екпертам, які будуть розпізнавати, чи є об'єкт на зображенні, чи ні, а якщо є, то до якого з двох класів він відноситься.

Загальна схема описаного експерименту показана на рис. 3.1.

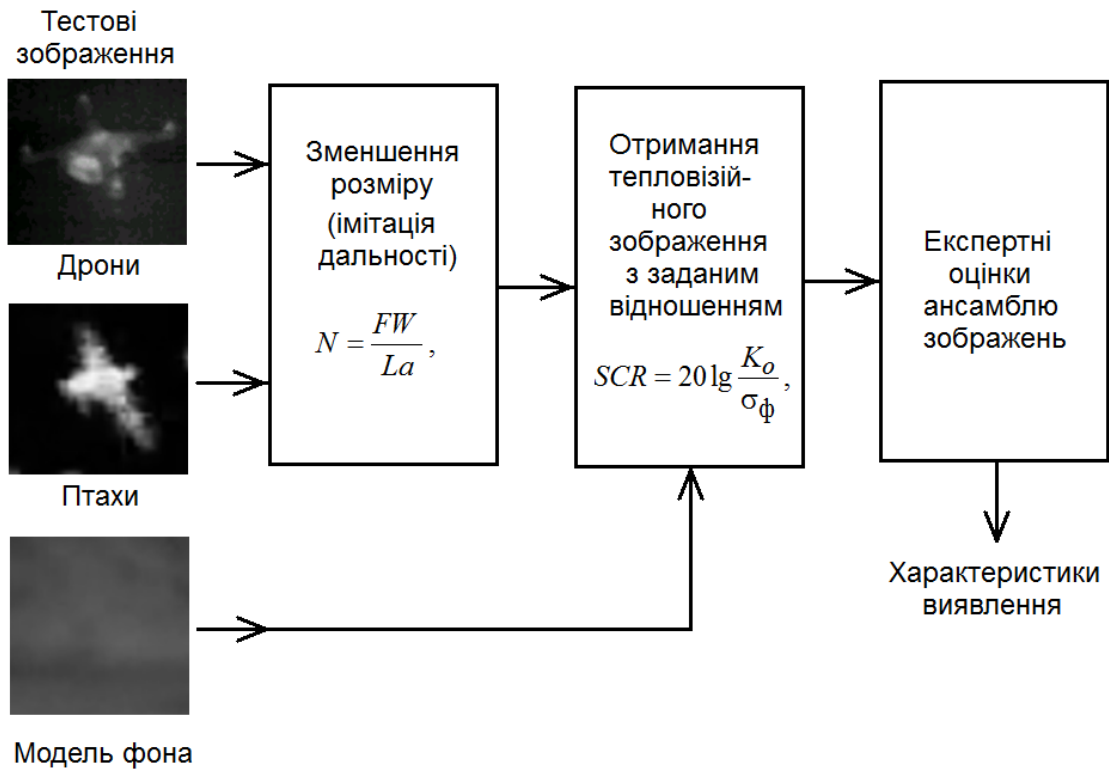


Рисунок 3.1 – Загальна схема експерименту з визначення характеристик виявлення дронів в тепловізійному каналі

3.2 Експериментальне отримання тестових тепловізійних зображень

Для отримання тестових тепловізійних зображень дронів та птахів був використаний тепловізор FLIR TG167, який є тепловізором початкового рівня (рис.3.2). Поєднуючи функції тепловізора та пірметра він найчастіше використовується як інструмент для операцій енергоаудиту.



Рисунок 3.2 – Тепловізор FLIR TG167

Тепловізор FLIR TG167 оснащений матрицею 80 x 60, яка в комплекті з фіксованою оптикою (кут огляду $25^{\circ} \times 19.6^{\circ}$) забезпечує чутливість 150 мК (NETD), і просторову роздільну здатність 5,6 мрад ($0,32^{\circ}$).

Попередні експерименти в умовах міста показали наявність помітного рівня теплових фонових завад від будівель, транспорту, людей. Отримання тестових зображень відбувалося в прохолодний похмурий день в польових умовах в Харківській області, Україна. Місце проведення експерименту на Гугл-мапі показано на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Місце проведення експерименту на Гугл-мапі

Температура повітря складала -1°C , відносна вологість 86%.

В експерименті використано дрон DJI Phantom 3 SE з горизонтальним розміром близько 0,33 м (рис.3.4).



Рисунок 3.4 – Зовнішній вигляд дрона DJI Phantom 3 SE

Тестові польоти відбувалися на відстані до 25 м. Відстань контролювалася по даним бортового GPS приймача дрону.

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 зі 100 зображень дрону розміром 60 x 60. Схожим чином було отримано також набір зі 100 зображень птахів. Найхарактерніші з цих зображень показані на рис.3.5 і рис. 3.6.



Рисунок 3.5 – Характерні тестові тепловізійні зображення дрону



Рисунок 3.6 – Характерні тестові тепловізійні зображення птахів

Звертає на себе увагу, що крім акумуляторної батареї дрону та двигунів суттєвий нагрів має і його бортова камера. Основне джерело нагріву в камері – це матричний перетворювач світло-сигнал.

3.3 Формування моделі фону

Для формування моделі фону програмно формуються 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 ймовірності $p(L_{\Phi})$ та просторовим спектром $\Phi(v_x, v_y)$. За даними роботи [6] закон розподілу флуктуацій $\Delta L_{\Phi}(x, y)$ для атмосфери близький до біноміального, а просторовий спектр досить точно апроксимується функцією

$$\Phi(v_x, v_y) = A(v_x^2 + v_y^2)^{-11/6}, \quad (3.5)$$

де A – деяка константа.

Відповідний алгоритм програмної побудови моделі фону $L_{\Phi}(x, y)$ наведено на рис. 3.7. На рис.3.8 показані зображення моделі теплового фону, отримані в середовищі MATLAB.

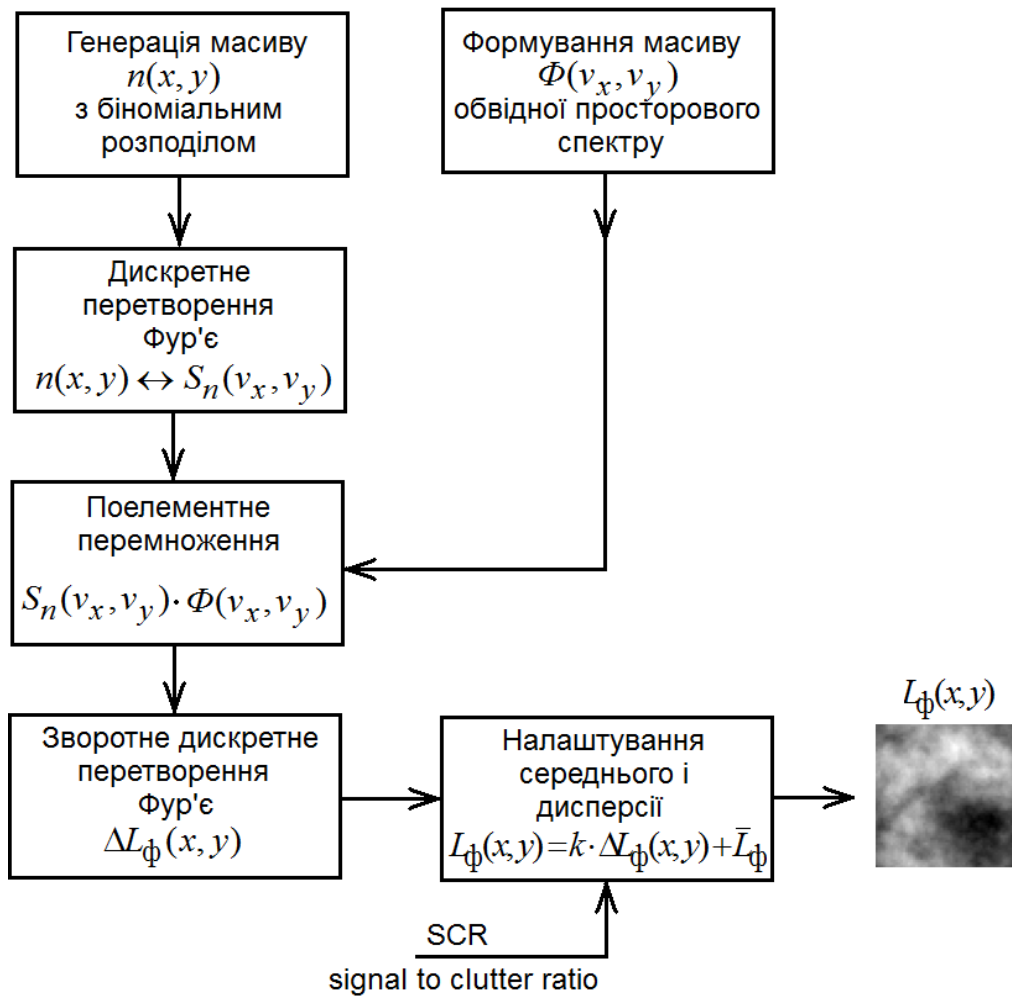


Рисунок 3.7 – Алгоритм програмної побудови моделі фону

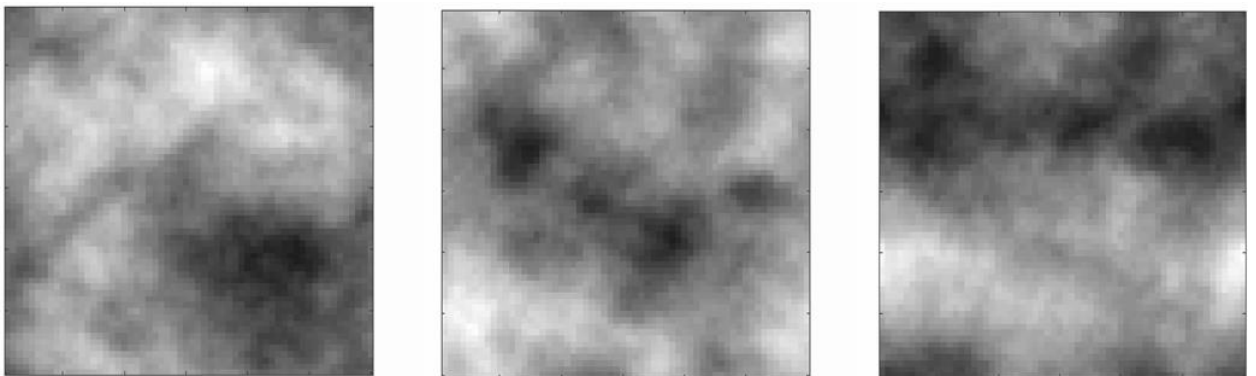


Рисунок 3.8 – Характерні зображення моделі теплового фону

3.4 Експертна оцінка характеристик виявлення

Методи експертних оцінок є частиною великої галузі теорії прийняття рішень, а саме експертне оцінювання – процедура отримання оцінки на основі думки експертів з метою подальшого прийняття рішення.

Способи вимірювання об'єктів.

1. Ранжування – це розташування об'єктів у порядку зростання або зменшення будь-якої властивої їм властивості. Ранжування дозволяє вибрати з досліджуваної сукупності факторів найістотніший.

2. Парне порівняння – встановлення переваги об'єктів при порівнянні всіх можливих пар. Тут не потрібно, як при ранжируванні, впорядковувати всі об'єкти, необхідно в кожній парі виявити більш значущий об'єкт або встановити їх рівність.

3. Безпосередня оцінка. Часто буває бажаним не лише впорядкувати (ранжувати об'єкти аналізу), а й визначити, наскільки один фактор є більш значущим за інші. І тут діапазон зміни параметрів об'єкта розбивається деякі інтервали, кожному у тому числі приписується певна оцінка (бал), наприклад, від 0 до 10. Саме тому спосіб безпосередньої оцінки іноді називають також бальним способом.

В нашому випадку, оскільки обираємо об'єкт з двох класів, застосовуємо метод попарного порівняння.

В експертних оцінках повинні брати участь не менше 10 експертів, які повинні переглядати отримані зображення на моніторі в оригінальному розрізненні 60x60 пікселів. Кожному повинен демонструватися набір зі 100 тестових зображень для кожного відношення сигнал-фон, 50 серед яких – дрони, 50 – птахи. Послідовність зображень повинна бути випадковою.

Експерти в спеціальній карточці мають робити помітки про наявність або відсутність цілі, а в разі наявності – до якого класу вони її відносять, до дронів або до птахів.

Для формування узагальненої оцінки групи експертів найчастіше використовуються середні величини:

$$X_n = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{nj}, \quad (3.6)$$

де x_{nj} – оцінка j -им експертом n -го кадру,

m – загальна кількість експертів.

В результаті проведених експертних оцінок отримані середні коефіцієнти зменшення дальності виявлення (табл.3.1) та розпізнавання (табл.3.2) дронів у різних умовах нерівномірності фону.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнт погіршення виявлення у різних умовах нерівномірності фону

Ймовірність виявлення	Нерівномірність		
	низька (SCR=10)	середня (SCR=3)	висока (SCR=1)
1,0	2,992	4,928	-
0,95	1,76	3,344	-
0,9	1,584	2,992	12,32
0,8	1,32	2,288	8,8
0,5	1,08	1,76	4,4

Таблиця 3.2 – Коефіцієнт погіршення розпізнавання у різних умовах нерівномірності фону

Ймовірність розпізнавання	Нерівномірність		
	низька (SCR=10)	середня (SCR=3)	висока (SCR=1)
1,0	3,791	6,244	-
0,95	2,23	4,237	-
0,9	2,007	3,791	15,61
0,8	1,6725	2,899	11,15
0,5	1,115	2,23	5,575

З цих отриманих даних видно, що дальність з забезпеченням 50%-ної ймовірності виявлення цілі в залежності від властивостей фону змінюється в 4 рази – від 1,08 до 4,4. Для 90%-ної ймовірності дальність виявлення змінюється майже у 8 разів. Більш високої ймовірності виявлення цілі в умовах сильно нерівномірного фону досягти взагалі виявилось неможливо.

Дальність з забезпеченням 50%-ної ймовірності розрізнення цілі в залежності від властивостей фону змінюється в 5 разів – від 1,11 до 5,57. Для 90%-ної ймовірності дальність розрізнення змінюється майже на порядок.

3.5 Висновки по розділу 3

Отже, в реальних умовах можливість виявлення дронів в тепловізійному каналі суттєво залежить від нерівномірності теплового контрасту фону. Уточнити отримані результати можна з використанням замість моделі теплового фону реальних тепловізійних зображень атмосферних утворень.

Слід зазначити, що головним шляхом для підвищення дальності виявлення дронів в тепловізійному каналі є не підняття чутливості тракту (її і так достатньо), а підвищення просторової роздільної здатності системи за рахунок застосування матричних перетворювачів з меншим розміром елементів і об'єктивів з більшою фокусною відстанню.

ВИСНОВКИ

Сьогодні безпілотні літальні апарати знаходяться у вільному доступі, за ціною вони досить доступні та легкі в управлінні. Зі збільшенням продажів дронів зростає і статистика злочинів, вчинених із їх застосуванням. Отже, актуальною є задача своєчасного виявлення дронів в місцях їх незаконного використання.

Сучасні дрони мають низький рівень помітності. Для виявлення дронів використовують радіолокаційний, радіочастотний, акустичний і оптико-електронний канали, а також комплексують ці методи. В даній кваліфікаційній роботі досліджується тепловізійний канал.

Мета дослідження – отримати числові оцінки дальності виявлення, розпізнавання та ідентифікації малих дронів в тепловізійному каналі з врахуванням характеристик випромінення цілі і фону.

Аналіз показав, що чутливість сучасних тепловізорів прямого бачення (FLIR) дуже висока, вони можуть розрізняти мінімальний температурний контраст 50 мК, мають високе просторове розрізнення (зображення до 1920 x 1080 і навіть вище), високу частоту кадрів (25 к/с і вище). Головним обмеженням для виявлення, розпізнавання і ідентифікації об'єктів при цьому є теплові фонові завади.

Для оцінки ефективності тепловізійного каналу спостереження був обраний критерій Джонсона. Він експериментально визначає роздільну здатність, необхідну для виявлення, орієнтації, розпізнавання і ідентифікації об'єктів, що спостерігаються у прилади нічного бачення, з певною вірогідністю. В нашому випадку достатньо двох ключових рівнів: перший – виявлення об'єкта в зоні спостереження, другий – розпізнавання класу об'єкту.

На основі критерію Джонсона розраховані граничні дальності виявлення, розпізнавання і ідентифікації дрону DJI Phantom 3 для тепловізійного каналу при різних вірогідностях розрізнення. Розрахунок

проведено для найпоширеніших в даний час розмірів приймального елемента (пікселя) матричних сенсорів 25 мкм та 17 мкм та ряду стандартних фокусних відстаней об'єтивів 25, 50, 75, 100, 150 мм. Розміри дрону прийняті 0,33 x 0,33 м. На підставі цих даних побудовано графік характеристик виявлення для фокусної відстані об'єктиву 100 мм і розміру елемента сенсора 17 мкм. Криві виявлення для інших значень F і a можна отримати з врахуванням відповідного коефіцієнту пропорційності.

Найменші дальності розраховані для $F=25$ мм і $a=25$ мкм: виявлення 168 м; розпізнавання 81 м; ідентифікації 23 м. Найбільші дальності розраховані для $F=150$ мм і $a=17$ мкм: виявлення 1500 м; розпізнавання 700 м; ідентифікації 200 м. При збільшенні вірогідності з 0,5 до 0,9 відповідні дистанції збільшуються майже вдвічі, а до 0,95 – майже втричі.

Прогнозування ефективності тепловізійного каналу системи виявлення дронів у реальних умовах вимагає врахування таких факторів, як характеристики виявленої цілі (контраст з фоном, форма, особливості контуру), характеристики фону (яскравість, рівномірність фону). Розрахунок на основі критерію Джонсона в чистому вигляді, призведе до сильно завищених очікувань щодо ефективності систем у реальних умовах.

Вплив зазначених факторів враховано у ході натурного і модельного експерименту. Для врахування характеристик об'єкту слід отримати певну кількість його тепловізійних зображень з достатньо високим розрізненням в різних ракурсах, в різних режимах польоту. Точно так же слід отримати ряд тепловізійних зображень рухомих об'єктів, які не відносяться до класу дронів, наприклад – птахів.

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

Для моделювання фону до тепловізійного зображення об'єкту слід додати сигнал фонових утворень з відповідним законом розподілу і

кореляційними властивостями. Характеристики виявлення для різних відношень сигнал – фонова завада можна отримати методом експертних оцінок.

Для отримання тестових тепловізійних зображень дронів та птахів був використаний тепловізор FLIR TG167. Він оснащений матрицею 80 x 60, має кут огляду $25^\circ \times 20^\circ$, забезпечує чутливість 150 мК і просторову роздільну здатність 0,32°.

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 зі 100 зображень дрону розміром 60 x 60. Схожим чином було отримано також набір зі 100 зображень птахів. Звертає на себе увагу, що крім акумуляторної батареї дрону та двигунів суттєвий нагрів має і його бортова камера.

Моделі фону формувалася MATLAB як псевдовипадкова двовимірна реалізація 60x60 з біноміальним законом розподілу і двовимірною кореляційною функцією, що відповідає реальним флуктуаціям теплового фону.

В експертних оцінках з виявлення та розпізнавання об'єктів брали участь 10 студентів, які переглядали отримані зображення на моніторі в оригінальному розрізненні. Кожному демонструвався набір зі 100 тестових зображень для кожного відношення сигнал-фон, 50 серед яких – дрони, 50 – птахи. Послідовність зображень була випадковою. Експерти в спеціальній карточці мають робити помітки про наявність або відсутність цілі, а в разі наявності – до якого класу вони її відносять, до дронів або до птахів. Для формування узагальненої оцінки групи експертів використовувалися середні величини.

В результаті отримані середні коефіцієнти зменшення дальності виявлення та розпізнавання дронів у різних умовах нерівномірності фону.

З отриманих даних видно, що дальність з забезпеченням 50%-ної ймовірності виявлення цілі в залежності від властивостей фону змінюється в

4 рази – від 1,08 до 4,4. Для 90%-ної ймовірності дальність виявлення змінюється майже у 8 разів. Більш високої ймовірності виявлення цілі в умовах сильно нерівномірного фону досягти взагалі виявилось неможливо.

Дальність з забезпеченням 50%-ної ймовірності розрізнення цілі в залежності від властивостей фону змінюється в 5 разів – від 1,11 до 5,57. Для 90%-ної ймовірності дальність розрізнення змінюється майже на порядок.

Отже, в реальних умовах можливість виявлення дронів в тепловізійному каналі суттєво залежить від нерівномірності теплового контрасту фону. Уточнити отримані результати можна з використанням замість моделі теплового фону реальних тепловізійних зображень атмосферних утворень. Також слід провести оцінки з розпізнаванням сигналів нейронною мережею. Але для глибокого навчання нейронної мережі потрібно мати декілька тисяч тепловізійних зображень дронів та інших класів об'єктів.

Слід зазначити, що головним шляхом для підвищення дальності виявлення дронів в тепловізійному каналі є не підняття чутливості тракту (її і так достатньо), а підвищення просторової роздільної здатності системи за рахунок застосування матричних перетворювачів з меншим розміром елементів і об'єктивів з більшою фокусною відстанню.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для вузов. – Изд. 4-е, перераб. и дополн. – М. : ЛОГОС, 1999. – 360 с.
2. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л. : Машиностроение, 1983. – 696 с.
3. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета : учеб. пособие. – Новосибирск : СГГА, 2005. – 215 с.
4. Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф. Оптико-электронные приборы космических аппаратов. – М. : Машиностроение, 1972. – 368 с.
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения / пер. с англ. М. В. Васильченко; под ред. А. И. Горячева. – М. : Мир, 1978. – 414 с.
6. Сухопаров С. А., Пизюта Б. А. Дальность действия приборов ночного видения пассивного типа // Точность и надежность оптико-механических приборов. – 1973. – № 1. – С. 16–21.
7. Сухопаров С. А., Пизюта Б. А. К вопросу дальности действия приборов ночного видения // Труды НИИГАиК. – 1974. – Т. 32. – С. 25–32.
8. Тымкул В. М., Тымкул Л. В. Энергетический расчет оптико-электронных приборов и систем. Теория и методы : учеб. пособие. – Новосибирск : НИИГАиК, 1993. – 59 с.
9. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 544 с.
10. Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.
11. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике в 4-х томах. Том 1 - Физика ИК-излучения. – М.: «Мир», 1995. – 606 с.
12. Волф У., Цисис Г. Справочник по инфракрасной технике в 4-х томах. Том 4 – Проектирование инфракрасных систем. – М.: «Мир», 1999. – 472 с.

13. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: «Мир», 1972. – 535 с.
14. 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 (дата звернения 1.12.2021).
15. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : Логос, 2004.
16. Дмитриев Е. Фотоприемники для работы в мультиспектральных оптоэлектронных системах. Проблемы создания // «Электроника»: Наука, технология, бизнес. – 2005. – №8.
17. Овсяк В.Н. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001. – 243 с.
18. ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" URL: http://soi.srv.pu.ru/r_1251/directions/dir1/dir1.htm (дата звернения 1.12.2021).
19. Сайт фирмы FLIR [Электронный ресурс]. URL: http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Security/PanTilt_Zoom/ThermoVision_2000,3000_MS/TVS2000-3000.pdf (дата звернения 1.12.2021).
20. Сайт фирмы «Eurolase photonics» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eurolase.ru/titanium.pdf> (дата звернения 1.12.2021).
21. 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.
22. 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.
23. 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.

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

25. 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.

26. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Zubkov O.V., Koryttsev 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.

27. 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.

28. 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 Electronics (UkrMiCo'2019), 9–13 September 2019, Odessa, Ukraine, 4 p.

29. 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 Conference. Problems of Infocommunications. Science and Technology. Kharkiv, Ukraine. October 6-9, 2020. – 5 p.

30. 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 диапазоне // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2020. – Вып. 202. – С. 125 – 134.

31. 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.

32. 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.

33. Johnson J. Analysis of Image Forming Systems. Image Intensifier Symposium, Fort Belvoir, VA, 6-7 October 1958.

34. Biberman L. "Perception of Displayed Information", Plenum Press, New York, 1973.

35. Harney R. "Combat Systems vol. 1: Sensors", Chapter 14: Imaging and Image-based Perception. 2005.

36. i-LIDS User Guide: Imagery Library for Intelligent Detection Systems. Home Office Scientific Development Branch Langhurst House, Langhurstwood Road, Horsham, RH12 4WX, United Kingdom, 2009.

37. НИКИТИН С. Тепловизоры: мифы и реальность. АЛГОРИТМ безопасности. №4, 2011.

38. Self H. "Image Evaluation for the Prediction of the Performance of a Human Observer", NATO Symposium on Image Evaluation, 18-22 August 1969.

39. Volimerhausen R., Jacobs E., Driggers R. New metric for predicting target acquisition performance. U.S. Army Communications and Electronics Command Night Vision and Electronic Sensors Directorate, Fort Belvoir. 2003

40. Johnson J. and Lawson W. "Performance Modeling Methods and Problems", Proceedings of IRIS Specialty Groups on Imagery, January 1974.

41. Rosell F. and Willson R. "Recent Psychophysical Experiments and the Display Signal-to-Noise Ratio Concept," in L. M. Biberman (ed.), Perception of Displayed Information, New York, NY: Plenum Press, 1973.

42. Leachtenauer J. Surveillance and Reconnaissance Systems: Modeling and Performance Prediction, 2001.

43. Chen X., Schmid N. On the Limits of Target Recognition in the Presence of Atmospheric Effects. Lane Department of Computer Science and Electrical Engineering West Virginia University, Morgantown. 2007.

44. Wilson D. Image based contrast-to-clutter modeling of detection. US Army CECOM NVESD, 10221 Burbeck Rd., STE 430 Ft. Belvoir. 1999.

45. Meitzler T., Gerhart G., Sohn E. Detection Probability Using Relative Clutter in Infrared Images. US Army Tank-Automotive and Armaments Command Survivability Technology Center, Research and Engineering Center (TARDEC), Warren, MI. 1998.

46. Donohue J. Introductory review of target discrimination criteria, Final Report, 16 April 1991 - 31 December 1991, Phillips Laboratory Air Force Systems Command Hanscom Air Force Base, Massachusetts.

47. O’Kane B. Cycle Criteria for Detection of Camouflaged Targets, US Army RDECOM CERDEC NVESD Ft. Belvoir, 2005.

48. Moyer S. Modeling challenges of advanced thermal imagers. Georgia Institute of Technology. 2006.

49. Білюк В.В. Вплив ослаблення звуку у атмосфері на просторову мінливість спектрів акустичного випромінювання БПЛА // 25-й Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті». Зб. матеріалів форуму. Т. 3. – Харків: ХНУРЕ. 2021. – с. 37 – 38.

50. 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.