

Танчук В.С.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Колобродов В.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ

В даній роботі запропоновано метод моделювання тепловізійних зображень об'єктів, що базується на системному підході до формування тепловізійного інфрачервоного сигналу. Головною метою цього дослідження є розробка методики моделювання синтетичних тепловізійних зображень з урахуванням фізичних і технічних характеристик реального тепловізора. Відповідна методика є особливо актуальною для задач комп'ютерного зору, де критично необхідно мати якісний та правдивий набір даних, який впливає на ефективність навчання моделей штучного інтелекту (ШІ) для автоматизованого виявлення та розпізнавання цілей та полегшує розробку алгоритмів автоматичних систем спостереження. Також використання моделювання тепловізійних зображень дає змогу адаптувати та підготувати систему до змін, які можуть виникати в процесі експлуатації. Тест-об'єктом спостереження, для якого виконується модуляція в цій роботі, є безпілотний літальний апарат (БПЛА).

Метод складається з двох основних етапів. На першому етапі виконується рендер тепловізійного зображення сцени, враховуючи закон Планка та випромінювальну здатність матеріалів об'єкта, за допомогою програмного пакета 3D моделювання, результатом якого є псевдо тепловізійне зображення з відповідним об'єктом спостереження. Другим етапом є цифрова постобробка, яка імітує вплив оптичної системи (ОС) тепловізора на якість зображення, враховуючи параметри тепловізора та його особливості. Під час пост обробки розраховується вплив об'єктива та мікроболометричної матриці (МБМ) ОС тепловізора, що описується через модуляційну передавальну функцію (МПФ). Для обчислення МПФ враховуються реальні параметри тепловізора, такі як фокусна відстань, розмір вхідної зіниці, розмір пікселя, довжина хвилі випромінювання та частота кадрів. В результаті отримуємо двовимірний частотний фільтр, який застосовується до ідеального зображення у частотній області. Після цього використовуються ще кілька функцій пост-обробки.

В результаті було змодельовані тепловізійні зображення з урахуванням фізичних властивостей тепловачення та характеристик реального тепловізора та проведено їх порівняння з реальними тепловізійними зображеннями.

Ключові слова: моделювання, тепловізор, пост-обробка, безпілотний літальний апарат, дрон, закон Планка, модуляційна передавальна функція, штучний інтелект.

Постановка проблеми. Тепловізійні системи спостереження (ТСС) все частіше починають використовуватись у системах автоматичного виявлення та розпізнавання об'єктів. Експлуатація таких систем дає змогу виявити та розпізнати об'єкти в таких умовах, в яких системи зі звичайними камерами видимого діапазону не мають змоги надати відповідну точність. Для прикладу, в нічний час або під час опадів, що спричиняє обмежену видимість об'єктів спостереження. Проте автоматичні ТСС мають ряд недоліків, які можуть значно знизити ефективність роботи такої системи. Одним із таких недоліків є обмежена кількість тепловізійних даних та сцен, які

можна використати для навчання моделей розпізнавання, розробки алгоритмів та адаптації системи до постійних змін.

У задачі виявлення та розпізнавання БПЛА ефективне навчання моделей ШІ ускладнюється через обмежену кількість відкритих тепловізійних датасетів. Це зумовлено як високою вартістю тепловізійного обладнання, так і технічними труднощами його використання в системах спостереження, що, у свою чергу, обмежує масштабованість польових досліджень та доступність якісних даних. Окрім цього, моделі комп'ютерного зору, які були навчені на даних з одного типу тепловізора, можуть втратити точ-

ність у разі заміни приладу на інший через відмінності оптичних параметрів. Ще однією проблемою є поява нових типів БПЛА. ТСС, яка раніше не мала подібних об'єктів в датасеті під час навчання, може не розпізнати їх під час роботи, а створення нового навчального набору під кожну нову модель дрона є ресурсомістким завданням і вимагає часу, що суттєво знижує адаптивність системи до нових загроз.

У зв'язку з вище зазначеними проблемами, виникає потреба у знаходженні методу модуляції тепловізійних зображень, в якому можна легко змінювати об'єкти розпізнавання. Модуляція тепловізійних зображень повинна враховувати фізичні властивості теплобачення та адаптувати зображення під відповідні параметри тепловізора, який використовується в ТСС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні декілька років усе частіше починають набувати розвитку дослідження систем спостереження з використанням тепловізійних систем та ШІ. Більшість цих досліджень зіштовхуються з проблемою обмеженої кількості тренувальних даних, які можна використовувати для навчання моделей та розробки алгоритмів виявлення та розпізнавання. Ця проблема впливає на точність та ефективність таких систем.

У роботі [1] розглядається ця проблема і рішення, яке пропонує автор, полягає в використанні зображень видимого діапазону, до яких застосовують цифрову обробку зображень для їх перетворення у псевдо тепловізійні. Такий підхід є доволі обмеженим через те, що цифрова обробка складається лише з декількох простих етапів, таких як переведення кольорового зображення у відтінки сірого, переведення у HSV формат та інверсія. Як результат, зображення приймають вигляд псевдо інфрачервоного (ІЧ) діапазону, проте не було враховано фізичні властивості теплобачення та особливості обробки ІЧ сигналів тепловізором. Згідно з результатами дослідження, які були викладені автором, точність виявлення моделей зростає приблизно на 10%, але лише в тому випадку, коли кількість тепловізійних зображень мало. Коли кількість тепловізійних зображень збільшується, то великого приросту в точності не має. Це свідчить про те, що для досягнення високої точності виявлення необхідно мати багато справжніх тепловізійних зображень.

У своєму дослідженні [2], для порівняння різних типів існуючих моделей виявлення об'єктів для задач виявлення БПЛА, було використано

вище зазначений метод. До Anti-UAV Challenge датасету [3] було додано зображення дронів з Drone vs Bird Challenge датасету [4] та перетворено їх у псевдо тепловізійні зазначеним вище методом. Цей підхід дозволив збільшити розмір датасету майже у два рази та збільшив точність моделей. Проте точність моделей, які досліджувались, була недостатньою. Для досягнення кращого результату необхідно було збільшити кількість реальних тепловізійних зображень або знайти метод модуляції зображень, які враховують фізичні властивості теплобачення.

У дослідженні [5] запропоновано систему ThermalSynth для створення синтетичних теплових зображень людей, згенерованих за допомогою ігрового рушія Unity, з реальними тепловими фонами. Для апроксимації зовнішнього вигляду синтетичних персонажів у тепловому діапазоні було використано шейдер, заснований на законі Стефана-Больцмана [6]. Також застосовується постобробка отриманих зображень для їх наближення до реальних. Однак закон Стефана-Больцмана описує повне теплове випромінювання тіла та охоплює весь спектр електромагнітного випромінювання, тоді як тепловізійні системи можуть працювати тільки у певному діапазоні довжин хвиль. Тому для більш точної модуляції зображень під певний тип тепловізора краще використати закон Планка [7], який розраховує спектральну густину енергії для певного діапазону довжин хвиль. Проте закон Планка є дещо складнішим для імплементації, ніж закон Стефана-Больцмана. Також в цій роботі не враховувались характеристики ТСС, хоча це є доволі важливим фактором через те, що від типу тепловізора залежить якість отриманих зображень.

В роботі [8] описано новий метод розрахунку ймовірності розрізнення цілі контрастно обмеженою системою БПЛА. Розпізнавання проводиться оператором. Важливим аспектом є те, як враховані всі фізичні властивості теплобачення. Детально описано розрахунок МПФ тепловізійної системи та її вплив на ймовірність розпізнавання оператором цілі. Також завдяки цій роботі можна гарно побачити вплив оптичних параметрів тепловізора на МПФ. Цей метод можна адаптувати під систему виявлення об'єктів з використанням ТСС та ШІ та на основі цього знайти оптимальні параметри тепловізора, при яких ймовірність розпізнавання буде достатньою. Для цього необхідно розрахувати пороговий контраст моделі виявлення об'єктів. Це можна виконати, використавши модуляцію тепловізійних зображень.

Підбиваючи підсумки аналізу останніх досліджень та публікацій, можна сказати, що задача розробки методу моделювання тепловізійних зображень з урахуванням всіх властивостей тепловачення є актуальною.

Постановка завдання. Необхідно розробити метод моделювання тепловізійних зображень об'єктів, зокрема БПЛА, з урахуванням фізичних властивостей тепловачення та характеристик ТСС. Формування 3D сцен та заміна об'єктів спостереження повинна бути швидкою та простою. Змодельовані тепловізійні зображення необхідно порівняти із реальними тепловізійними зображеннями.

Виклад основного матеріалу. *Методика моделювання.* В даній роботі пропонується метод моделювання тепловізійних зображень на основі системного підходу, який складається з двох основних етапів. Першим етапом цього методу є створення 3D сцени, всі об'єкти якої будуть мати теплові характеристики, розраховані відповідно до фізичних властивостей тепловачення. В результаті буде створено ідеальні синтетичні тепловізійні зображення сцени. Основними вимогами до цього етапу є простота в додаванні та заміні об'єктів в 3D сцені та правдивість їх теплових характеристик. Другий етап полягає в пост-обробці отриманих синтетичних тепловізійних зображень для їх адаптації під реальні тепловізійні зображення. Для цього основною задачею є врахування властивостей тепловізора, його оптичних параметрів та характеристик, щоб максимально наблизити синтетичні зображення до реальних. Загальна схема запропонованого методу зображена на рис. 1.

Спочатку на першому етапі виконується розробка 3D моделі об'єкта дослідження, з використанням спеціального програмного забезпечення для створення тривимірної комп'ютерної графіки. У даній роботі в якості об'єкта використовується БПЛА. Після розробки моделі об'єкта присвоюються теплові характеристики, де необ-

хідно враховувати матеріал окремих елементів об'єкта та їх температуру. Також необхідно надати теплові характеристики всій сцені та всім фоновим об'єктам. Останнім кроком першого етапу є синтез ідеального тепловізійного зображення.

Першим кроком другого етапу є пост-обробка. Спочатку необхідно врахувати усі характеристики тепловізора та створити фільтр, використавши який зображення буде максимально наближене до реального. В результаті пост-обробки отримаємо синтезоване тепловізійне зображення, що максимально наближене до реального.

Створення синтетичних тепловізійних зображень. Як зазначалось раніше, першим етапом є синтез ідеальних тепловізійних зображень. В даному дослідженні для виконання задач на першому етапі в якості програмного пакета для створення 3D графіки використовується Blender версії 4.4.

Blender – це програмний пакет з відкритим кодом для створення якісного 3D-моделювання, анімації та графіки високої роздільної здатності. Дане ПЗ має достатню кількість функціоналу для реалізації поставлених задач. Також Blender має низький поріг входження для початку розробки 3D сцен у ньому [9].

Оскільки об'єктом дослідження в цій роботі є БПЛА, спочатку необхідно розробити 3D моделі необхідних нам дронів. У зв'язку з цим, було розроблено дві моделі дронів: DJI Mavic 3T та DJI Phantom 4 RTK. На рис. 2 зображені розроблені 3D моделі цих дронів.

Після цього необхідно присвоїти теплові характеристики для всіх елементів дронів, враховуючи температуру та матеріал. В Blender є робоче середовище під назвою «Shading» яке можна використати для присвоєння температурних профілів. Для цього треба створити спеціальну схему яка складається з декількох елементів. Розроблена схема зі середовища Shading зображена на рис. 3.

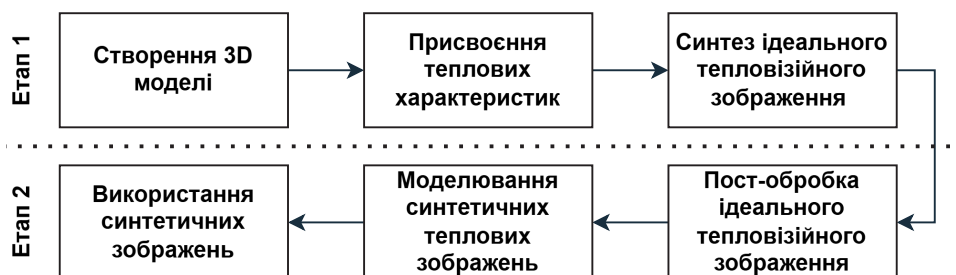


Рис. 1. Схема запропонованого методу моделювання

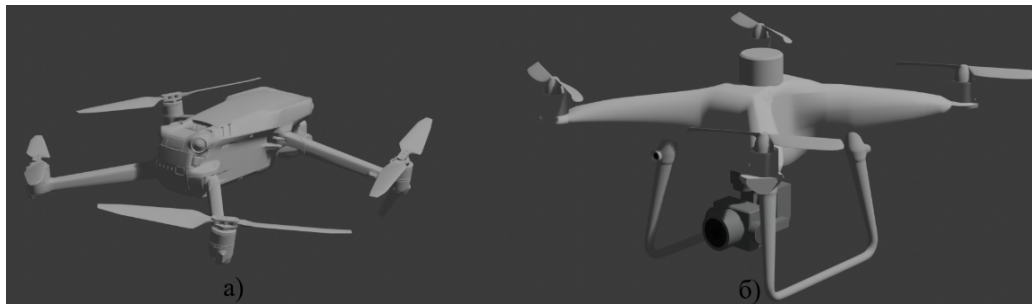


Рис. 2. 3D модель: а) DJI Mavic 3T; б) DJI Phantom 4 RTK

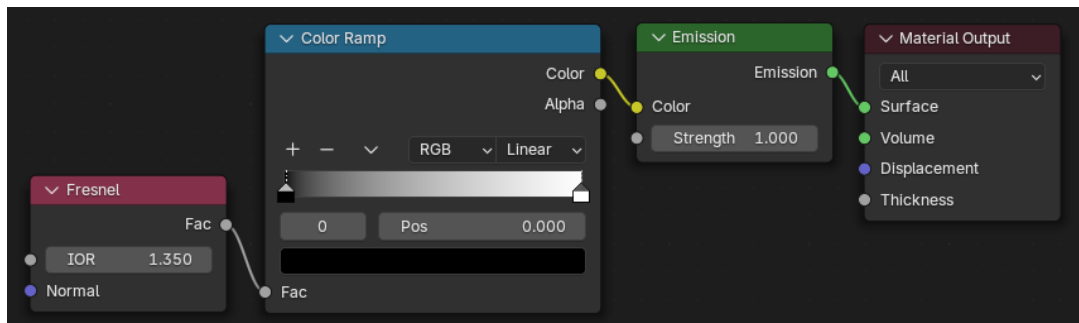


Рис. 3. Схема Shading теплового текстуровання елементів об'єкта

Для надання теплового випромінювання використовується властивість «Emission», де необхідно встановити параметр «Emission», який напряму залежить від енергетичної яскравості окремим елементом об'єкта. Синтезовані тепловізійні зображення будуть згенеровані у градаціях сірого, через що встановлюємо градієнт кольору від 0.0 до 1.0 (від чорного до білого), використовуючи параметр «Color Ramp». Аби тепловізійне випромінювання не здавалося занадто різким та залежало від кута огляду, можна додати ефект Френеля, який згладжує випромінювання на краях об'єкта. Для цього використовується параметр «Fresnel» з коефіцієнтом 1,35.

Для розрахунку енергетичної яскравості об'єктів можна використати закон Планка для певного спектрального діапазону довжин хвиль [10, с. 2]:

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \varepsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1} \quad (1)$$

де λ – довжина хвилі, $\lambda_1 - \lambda_2$ – діапазон довжин хвиль (у нашому випадку 8–14 мкм), c – швидкість світла, $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ – стала планка, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ – стала Больцмана, T – температура тіла в кельвінах, ε – спектральна випромінювальна здатність (тепловіддача) тіла.

Спектральна випромінювальна здатність залежить від діапазону довжин хвиль та матеріалу

об'єкта. Проте, вже відомі коефіцієнти для певних довжин хвиль та матеріалів, які були знайдені експериментальним шляхом. Як результат, знаючи температуру тіла та його матеріал, можна розрахувати енергетичну яскравість, яка є еквівалентом Emission Strength.

Для нас важливими є інформація про такі елементи дрона як двигуни, батареї, камери та корпусу. Усі ці елементи нагріваються найбільше. Основні параметри окремих елементів дрона наведені у табл. 1.

Після присвоєння теплових характеристик до окремих деталей дрона можна почати рендер ідеальних синтетичних тепловізійних зображень дронів. Фінальні зображення першого етапу можна побачити на рис. 5б.

Розрахунок МПФ тепловізора. Наступний етап складається з пост-обробки синтетичних тепловізійних зображень для максимального наближення їх до реальних. Для цього, як вже зазначалось раніше, необхідно врахувати оптичні параметри реального тепловізора. У зв'язку з цим, найкраще для цього підходить модуляційна передавальна функція.

Модуляційна передавальна функція (MTF – Modulation Transfer Function) – це характеристика оптичної системи, яка описує, наскільки добре вона передає контраст деталей різних просторових частот з об'єкта на зображення.

В даній роботі буде проводитись визначення МПФ тепловізора, який складається з об'єктива

Таблиця 1

Параметри елементів дрона

Елемент	$t_e, ^\circ\text{C}$	Матеріал	ϵ	$B_\lambda(\lambda, T)$	Джерело
Мотори	60 – 80	Анодований алюміній	0,856	94,107	[11, с. 2], [12, с. 10]
Батарея	25 – 100	Пластмасовий корпус	0.93	80,534	[13, с. 1], [14, с. 4]
Корпус	0 – 40	Пластмасовий корпус	0.93	53,342	[15], [14, с. 4]
Гвинти	30 – 40	Карбон	0.95	54,489	[16], [17, с. 10]
Камера	0 – 40	Пластмасовий корпус	0.93	45,706	[14, с. 4]

та мікроболометричної матриці (МБМ). Математичну модель ТСС розглядаємо в області просторових і часових частот та вважаємо, що дана система є лінійною інваріантною. Згідно з цими умовами, МПФ такої ТСС можна знайти добутком МПФ окремих її елементів [8, с. 25]:

$$M_s(v) = M_o(v) \cdot M_{Ds}(v) \cdot M_{Dt}(t) \quad (2)$$

де, v – просторова частота, $M_o(v)$ – МПФ об'єктива, $M_{Ds}(v)$ – просторова МПФ МБМ, $M_{Dt}(t)$ – часова МПФ МБМ.

МПФ дифракційно обмеженого об'єктива з діаметром входної зіниці D_{po} можна знайти за формулою [8, с. 25]:

$$M_o(v) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left(\arccos x - x \sqrt{1-x^2} \right), & 0 \leq x \leq 1 \\ 0, & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

де $x = \frac{v}{v_c}$ – співвідношення просторової частоти до граничної частоти об'єктива.

У свою чергу, граничну частоту об'єктива можна представити у вигляді диску Ейрі:

$$v_c = 1.22 \frac{f'_o \lambda}{D} \quad (4)$$

Проте функція (3) є доволі складною, але вона наближена до лінійної функції, у зв'язку з чим, для спрощення математичних перетворень, апроксимуємо функцію (3) лінійною функцією та підставимо формулу (4) у співвідношення. Як результат, отримаємо наступну апроксимовану МПФ для об'єктива:

$$M_o(v) = \begin{cases} 1 - 1.22 \cdot \lambda \frac{v}{D_{po}}, & 0 \leq v \leq 0.82 \cdot \frac{D_{po}}{\lambda} \\ 0, & x > 0.82 \cdot \frac{D_{po}}{\lambda} \end{cases} \quad (5)$$

Одновимірну просторову МПФ МБМ можна апроксимувати добутком сігнум функцій [18]:

$$M_{Ds}(v) = \text{sinc}\left(\frac{W_D}{f'_o} \cdot v\right) \text{sinc}\left(\frac{w_D}{f'_o} \cdot v\right) \quad (6)$$

де W_D та w_D – період матричної структури та розмір чутливої площадки пікселя відповідно.

У свою чергу, часова МПФ МБМ є просторовим фільтром низьких частот. Тому M_{Dt} можна представити в такому вигляді:

$$M_{Dt} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi t_D f)^2}} \quad (7)$$

де t_D – постійна часу МБМ, f – часова частота оновлення МБМ.

Для того, щоб показати вплив часової МПФ МБМ, необхідно знайти зв'язок між просторовою частотою v та часовою частотою f . Зв'язок між ними визначають співвідношенням [8, с. 26]:

$$f = \frac{\beta_D v}{t_0} \quad (8)$$

де β_D – кутовий розмір пікселя матриці, а t_0 – час формування сигналу одним пікселем.

Кутовий розмір пікселя матриці β_D можна знайти співвідношенням розміру одного пікселя МБМ до фокусної відстані об'єктива. Тому, підставивши формулу (8) у часову МПФ МБМ (7), маємо:

$$M_{Dt}(v) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi \frac{t_D W_D}{t_0 f'_o} v \right)^2}} \quad (9)$$

Маючи всі МПФ всіх елементів ТСС, ми маємо змогу розрахувати загальну МПФ ТСС як добуток МПФ всіх елементів.

Для прикладу, у даному дослідженні було задано такі параметри ТСС, для яких розраховується МПФ: фокусна відстань об'єктива $f'_o = 70$ мм, діаметр входної зіниці об'єктива $D_{po} = 70$ мм, розмір пікселя МБМ $W_D = 17$ мкм, розмір чутливої площадки $w_D = 14$ мкм, розмір МБМ $X_D = 6,8$ мм, постійна часу МБМ $t_D = 10$ мс, частота оновлення $f = 50$ Гц.

Використовуючи вище розглянуті функції, ми розраховали МПФ окремих елементів та результуючу МПФ ТСС. Розраховані МПФ можна знайти на рис. 4.

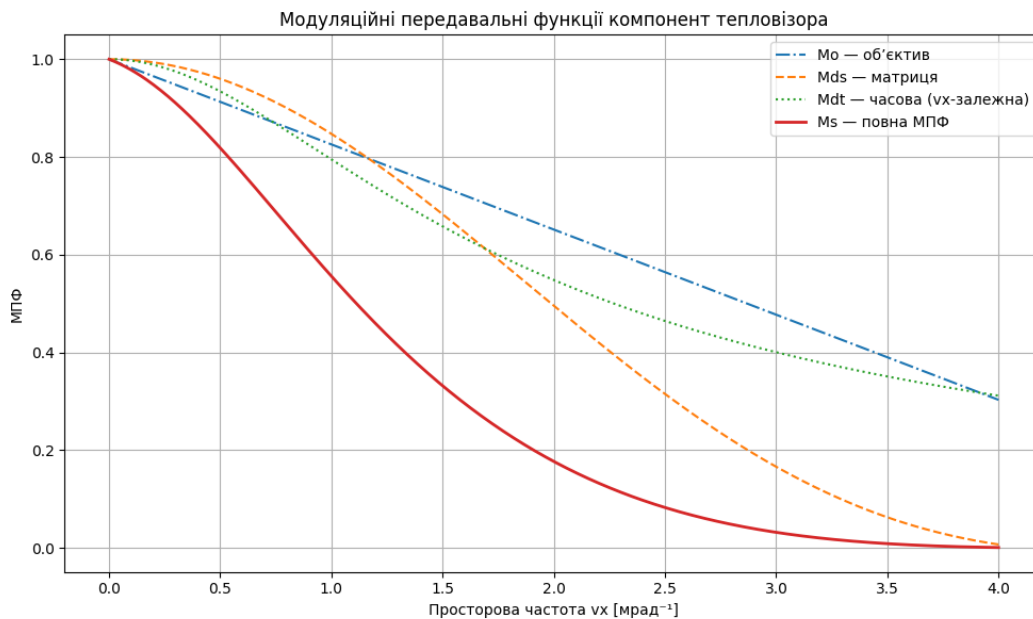


Рис. 4. Модуляційні передавальні функції МПФ

Пост-обробка синтетичних тепловізійних зображень. Перед тим як виконувати пост-обробку ідеальних тепловізійних зображень, отриманих з Blender, необхідно провести нормалізацію зображення. Тобто вхідне 16-бітне зображення нормалізується до діапазону від 0 до 1:

$$I_{norm} = \frac{I_{raw}}{2^n - 1} \quad (10)$$

де $n = 16$ – розрядність зображення.

Наступним етапом буде застосування МПФ фільтра, використовуючи розраховану МПФ заданої ТСС. Для цього необхідно створити двовимірний МПФ фільтр, використавши розраховану функцію. Вплив тепловізора на зображення можна описати як згортку в просторовій області або як множення на МПФ у частотній області. Тому використання МПФ фільтра на вхідне зображення можна описати наступною формулою:

$$I_{mif} = \Phi^{-1}[\Phi(I_{norm}) \cdot M_s] \quad (11)$$

де Φ – оператор прямого перетворення Фур'є, а Φ^{-1} – оператор зворотного перетворення.

Завдяки цьому підходу можна врахувати фізичне згладжування та втрату контрастності зображення через обмеження оптичної системи тепловізора.

Далі можна застосувати радіальну функцію вильєтування $V(x, y)$ для моделювання оптичних втрат по краях зображення. Ця функція зменшує інтенсивність пікселів від центру зображення [19]. У більш сучасних тепловізорах дана абера-

ція відсутня, тому ця функція повинна застосовуватись при необхідності:

$$I_v(x, y) = I_{norm}(x, y) \cdot V(x, y) \quad (12)$$

Наступним етапом є підсилення теплих об'єктів. Для цього до пікселів з інтенсивністю вище 0,95 застосовується нелінійне підсилення:

$$I_b(x, y) = \begin{cases} \min(1; 1.5 \cdot I_v(x, y)), & I_v > 0.95 \\ I_v(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

Відразу після підсилення необхідно перевести нормалізовані значення у фізичний температурний діапазон:

$$T(x, y) = T_{min} + I_b(x, y) \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (14)$$

Також важливим етапом буде модуляція теплового шуму через те, що синтезовані зображення взагалі його не мають. Для цього застосовується Гаусівський шум зі стандартним відхиленням, пропорційним шумово-еквівалентній температурі (NETD) [20]:

$$\begin{aligned} T_n(x, y) &= T(x, y) + f(0, \sigma^2) \\ \sigma &= NETD \cdot (T_{max} - T_{min}) \end{aligned} \quad (15)$$

де $f(0, \sigma^2)$ – це функція випадкових чисел за нормальним розподілом.

Наступним кроком буде імітація розмиття, з використанням Гаусівського згладжування [21]:

$$T_{blur} = G_\sigma \cdot T_n \quad (16)$$

де $\sigma = 1.5$, а $G_\sigma = [3 \ 3]$ – Гаусівське ядро.

Завершальним етапом пост-обробки є квантування, тобто перетворення зображення назад у n -розрядне зображення:

$$Q(x, y) = \left(\frac{T_{blur}(x, y) - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \cdot (2^n - 1) \right) \quad (17)$$

Результати пост-обробки та фінальні зображення розглянутого методу модуляції синтетичних тепловізійних зображень дронів зображені на рис. 5в.

Результати моделювання. Для порівняння та оцінки отриманих синтетичних тепловізійних зображень, використовуючи запропонований в цій роботі метод, було підібрано реальні тепловізійні зображення з дронами Mavic 3T та Phantom 4 RTK. Дані зображення було взято із набору даних Anti-UAV [3] з тих зображень, які не використовувались для навчання нейронної мережі. 3D сцени змодельованих зображень розроблялися максимально наближено до реальних. Одним нюансом реальних тепловізійних зображень є те, що відсутня інформація про тип та характеристики тепловізора, який їх створив. Тому для розрахунку МПФ ТСС використовувались найбільш розповсюджені параметри тепловізора.

На рис. 5 представлені (а) реальні зображення, (б) ідеальні синтезовані зображення, створенні застосунком Blender, та (в) фінальні змодельо-

вані синтетичні тепловізійні зображення після пост-обробки.

Для порівняння реальних зображень з синтетичними було розраховано локальну контрастність Вебера та середньоквадратичну (RMS) контрастність. Локальна контрастність Вебера використовується для порівняння яскравості дрібних елементів на великому однорідному фоні та розраховується за формулою:

$$C_w = \frac{I_o - I_b}{I_b} \quad (18)$$

Середньоквадратичну (RMS) контрастність розраховується по формулі:

$$C_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu)^2} \quad (19)$$

Також в минулому дослідженні [2] проводились аналіз та порівняння існуючих моделей виявлення об'єктів, в результаті чого було навчено моделі виявлення дронів на тепловізійних зображеннях. Тому для порівняння реальних та синтетичних тепловізійних зображень можна використати ці зображення та порівняти точність, з якою розпізнається дрон. В якості моделі буде використано YOLOv8m яка була навчена лише на тепловізійних зображеннях з датасету Anti-UAV. Результати порівняння наведені у таблиці 2. Також на рис. 6 зображені результати виявлення дронів на реальних і синтетичних зображеннях.

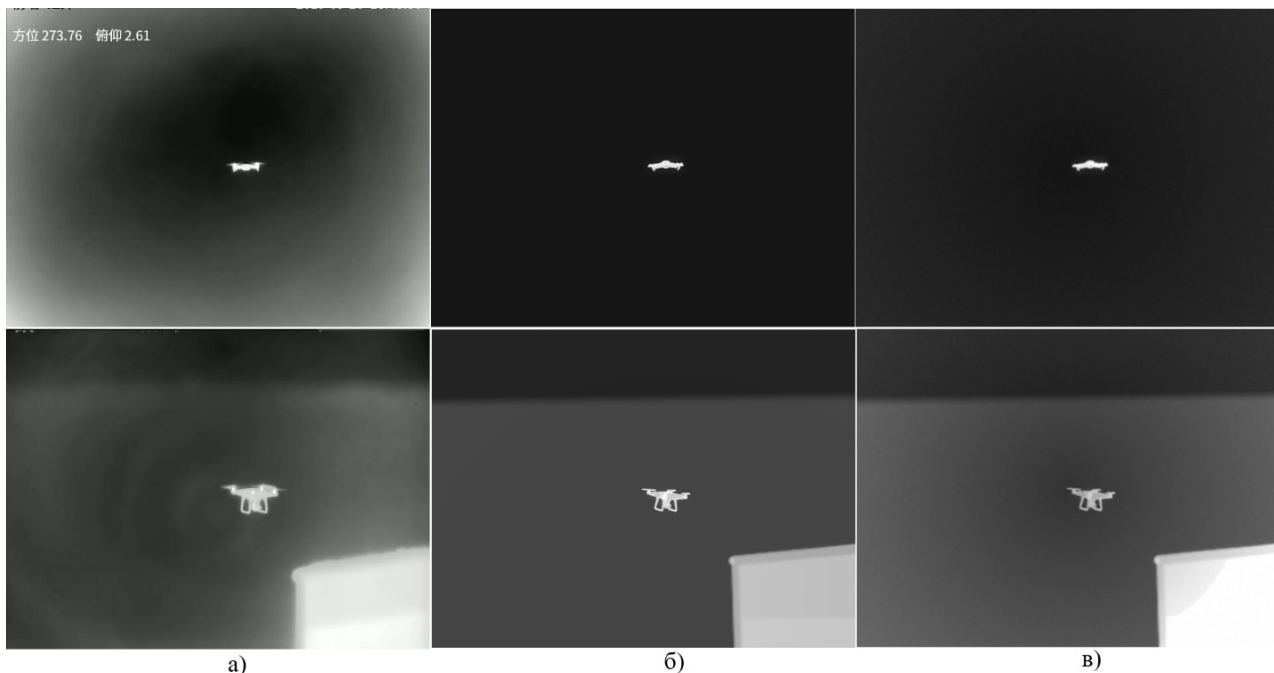


Рис. 5. Результати моделювання: а) реальне, б) синтезоване в Blender, в) синтезоване після пост-обробки

Провівши візуальне порівняння, можна дійти висновку, що запропонований метод модуляції дозволяє отримувати зображення, які є дуже близькими до справжніх. Завдяки присвоєнню різних теплових характеристик до різних елементів дрона, можна помітити, що такі елементи як двигун, батарея та камера виділяються із загального зображення. Це добре видно на зображеннях Phantom, що є важливо, адже для моделі необхідно мати точну інформацію про окремі шаблони, які зустрічаються на зображенні. Також можна помітити як відстань впливає на кількість корисної інформації як на реальному, так і на синтезованому зображеннях. Це помітно на зображеннях з Mavic 3T.

Також завдяки врахуванням фізичних властивостей теплобачення та характеристик тепло-

візора вдалося максимально наблизити синтезовані зображення до реальних. Це можна помітити, порівнявши контрастність та точність виявлення. Всі параметри доволі близькі один до одного.

Висновки. В даній роботі було запропоновано та реалізовано метод модуляції тепловізійних зображень на основі системного підходу. Для створення 3D сцен використовувався програмний застосунок Blender, в якому було створено 3D об'єкти та присвоєно теплові характеристики до окремих елементів дрона. Враховуючи випромінювальну здатність матеріалу та температуру, було розраховано Emission Strength, використовуючи закон Планка. Після створення ідеальних синтетичних тепловізійних зображень було проведено пост-обробку, враховуючи пара-

Таблиця 2

Результат порівняння

Тип дрону	Mavic 3T		Phantom 4 RTK	
	Реальне	Синтетичне	Реальне	Синтетичне
C_W	1,992	1,896	0.615	0.667
C_{RMS}	0,165	0,111	0,129	0,112
Точність виявлення	0,77	0,74	0,82	0,84

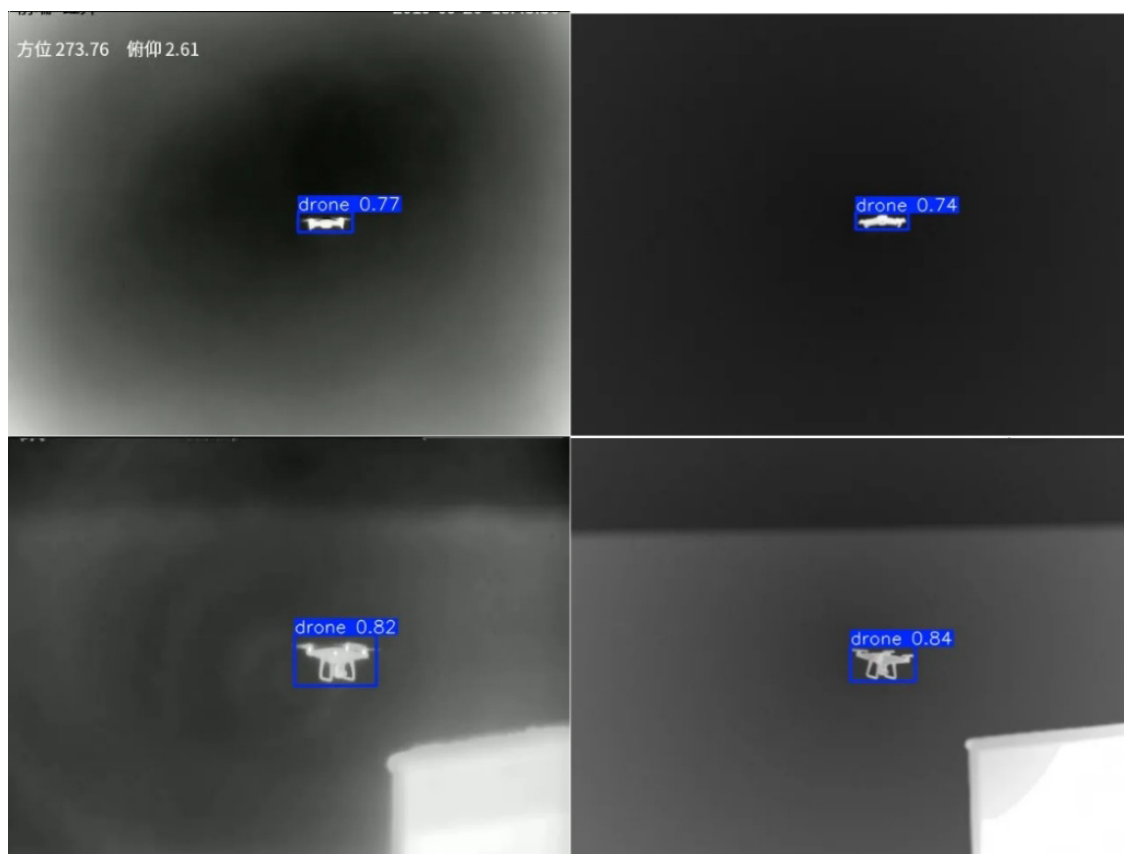


Рис. 6. Результат виявлення

метри тепловізора та втрати контрастності. Для цього була розрахована МПФ тепловізора та використана у вигляді фільтру використовуючи Фур'є перетворення. Також було додано тепловий шум та розмиття до зображення в рамках пост-обробки.

Результати показали, що синтезовані зображення наближені до реальних. Навчена модель на реальних тепловізійних зображеннях розпізнала та видала однакові результати виявлення як для реальних, так і для синтетичних зображень.

Запропонований метод є дієвим, простим в реалізації та експлуатації, тому що для створення синтезованих зображень з новим типом БПЛА, достатньо просто змінити 3D модель.

рення синтезованих зображень з новим типом БПЛА, достатньо просто змінити 3D модель.

В подальших дослідженнях можна розробити окремий аддон для Blender, який автоматично буде розраховувати Emission Strength, базуючись на матеріалі та температурі, та задавати відповідні теплові характеристики для об'єктів. Також, використовуючи даний метод, можна збільшити навчальний датасет для підвищення точності моделей виявлення БПЛА. На додаток, можна розрахувати порогову контрастність моделі ШІ для розпізнавання дронів, щоб розрахувати оптимальні параметри тепловізора для ТСС виявлення дронів.

Список літератури:

1. Sommer L., Schumann A. Deep learning-based drone detection in infrared imagery with limited training data. *SPIE, Counterterrorism, Crime Fighting, Forensics, and Surveillance Technologies IV*. 2020. Vol. 11542, P. 1154204. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2574171>
2. Танчук В.С., Колобродов В.Г. Аналіз існуючих моделей виявлення БПЛА на тепловізійних зображеннях. *Вісник КПІ. Серія Приладобудування: збірник наукових праць*. Вип. 2024. Вип. 68. Ч. 2. С. 5–10. DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.68\(2\).2024.318080](https://doi.org/10.20535/1970.68(2).2024.318080)
3. Anti-UAV Challenge Organizers. The 4th anti-uav workshop and challenge. URL: <https://anti-uav.github.io> (дата звернення: 10.05.2024)
4. Coluccia A., Fascista A., Sommer L., Schumann A., Dimou A., Zarpalas D. The Drone-vs-Bird Detection Grand Challenge at ICASSP 2023: A Review of Methods and Results. *IEEE Open Journal of Signal Processing*. 2024.
5. Madan N., et al. Thermalsynth: A novel approach for generating synthetic thermal human scenarios. *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*. 2023. P. 130–139.
6. Wellons M. The Stefan-Boltzmann Law. *Physics Department, The College of Wooster, Wooster, Ohio*. 2007. 44691: 25.
7. Plank M. The theory of heat radiation. *Entropie*. 1900, 144.190: 164.
8. Колобродов В.Г., Лихоліт М., Тягун В., Васильковська І., Колобродов М. Ймовірність розрізнення цілі контрастно обмеженою тепловізійною системою безпілота. *Космічна наука і технологія*. 2023. Вип. 29, Ч. 5, С. 20–32.
9. Fu J., Xia N., Lu Z., Shen D., Zhang J. Rapid Establishment of 3D Geological Model Based on Blender Software. *2024 International Seminar on Artificial Intelligence, Computer Technology and Control Engineering (ACTCE)*. Wuhan, China. 2024. P. 46–50. DOI: 10.1109/ACTCE65085.2024.00017.
10. Marr Jonathan M, Wilkin Francis P. A better presentation of Planck's radiation law. *American Journal of Physics*. 2012. Vol. 80(5), P. 399–405.
11. Mazur M., Skarka W., Kobielski M., Kądziaława D., Kubica R., Haas C., Unterberger H. Heat Exchange Analysis of Brushless Direct Current Motors. *Energies*, 2024. Vol. 17(24), 6469.
12. Gustavsen A., Berdahl P. Spectral emissivity of anodized aluminum and the thermal transmittance of aluminum window frames. *Nordic Journal of Building Physics*. 2003. Vol: 3.1970, P. 1–12.
13. Lalinde I., Berrueta A., Arza J., Sanchis P., Ursúa A. On the characterization of lithium-ion batteries under overtemperature and overcharge conditions: Identification of abuse areas and experimental validation. *Applied Energy*. 2024. Vol: 354, 122205.
14. Goddijn-Murphy L., Williamson. B. On thermal infrared remote sensing of plastic pollution in natural waters. *Remote Sens*. 2019. Vol: 11, 2159.
15. What Temperature Is Too Hot To Fly a Drone. 2022. URL: <https://droneflyingpro.com/what-temperature-is-too-hot-to-fly-a-drone> (дата звернення 15.04.2025)
16. Mukti S., Megawanto F. C., Arthaa H. Exhaust temperature analysis of UAV propeller materials. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri; Journal of Industrial Research and Innovation*. 2020. Vol: 14 (2), P. 93–98.
17. Adibekyan A., Kononogova E., Monte C., Hollandt J. Review of PTB measurements on emissivity, reflectivity and transmissivity of semitransparent fiber-reinforced plastic composites. *International Journal of Thermophysics*. 2019. Vol: 40, P. 1–14.

18. Kolobrodov V. H. Modulation transfer function of the thermal imaging monocular. *Вісник Національного технічного університету України Київський політехнічний інститут. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. 2019. Vol: 78, P. 74–78.
19. Zheng Y., Yu J., Kang S.B., Lin S., Kambhamettu C. Single-image vignetting correction using radial gradient symmetry. *In 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2008. P. 1–8.
20. Kennedy H.V. Modeling noise in thermal imaging systems. *SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing IV*. 1993. Vol. 1969.
21. Wink A.M., Roerdink, J.B. Denoising functional MR images: a comparison of wavelet denoising and Gaussian smoothing. *IEEE transactions on medical imaging*. 2004. Vol. 23 (3), P. 374–387.

Tanchuk V.S., Kolobrodov V.G. THERMAL IMAGE MODELING METHOD BASED ON A SYSTEMATIC APPROACH

This paper proposes a method for modeling thermal images of objects based on a systematic approach to the formation of a thermal imaging infrared signal. The main goal of this research is to develop a methodology for modeling synthetic thermal images, taking into account the physical and technical characteristics of a real thermal imager. The corresponding methodology is especially relevant for computer vision tasks, where it is critical to have a high-quality and reliable dataset, which affects the effectiveness of training artificial intelligence models for automated target detection and recognition, and facilitates the development of algorithms for automatic surveillance systems. Additionally, the use of thermal imaging modeling allows you to adapt and prepare the system for changes that may occur during operation. The test surveillance object for which modulation is performed in this work is an unmanned aerial vehicle (UAV).

The method consists of two main stages. The first stage is the rendering of a thermal image of the scene, taking into account Planck's law and the emissivity of the object's materials, using a 3D modeling software package, which results in a pseudo thermal image with the corresponding observation object. The second stage is digital post-processing, which simulates the influence of the optical system (OS) of the thermal imager on the image quality, taking into account the parameters of the thermal imager and its features. During post-processing, the influence of the lens and microbolometric matrix (MBM) on the OS of the thermal imager is calculated, which is described through the modulation transfer function (MTF). To calculate the MTF, real parameters of the thermal imager are considered, such as focal length, entrance pupil size, pixel size, radiation wavelength, and frame rate. As a result, we obtain a two-dimensional frequency filter, which is applied to the ideal image in the frequency domain. After that, several more post-processing functions are used.

As a result, thermal images were simulated, taking into account the physical properties of thermal vision and the characteristics of a real thermal imager, and their comparison with real thermal images was carried out.

Key words: modeling, thermal imager, post-processing, unmanned aerial vehicle, drone, Planck's law, modulation transfer function, artificial intelligence.