

УДК 004.932.2:681.7.06

DOI: 10.30837/0135-1710.2025.186.083

*Д.М. КРИЦЬКИЙ, Д.А. ОНІЩУК, О.О. ВАЛЮЖЕНИЧ***СИСТЕМА НА ОСНОВІ RGB-ДАТЧИКА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ КАМУФЛЯЖУ У ВІЙСЬКОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Дослідження присвячено розробці недорогої оптичної системи на основі RGB-датчика для виявлення замаскованих об'єктів у військовому середовищі. Метою дослідження є створення прототипу апаратно-програмної системи виявлення камуфляжу на основі RGB-датчика, що працює у видимому спектрі світла, з подальшою експериментальною перевіркою його ефективності у різних природних умовах. Система відзначається низьким енергоспоживанням, мобільністю та може бути інтегрована у портативні або безпілотні розвідувальні платформи. Для досягнення поставленої мети було вирішено такі задачі: розробка апаратної структури сенсорної системи на основі доступних компонентів; реалізація алгоритмів моделювання фону, виявлення кольорових аномалій та фільтрації шумів з використанням колориметричного аналізу у просторі RGB; проведення серії натурних експериментів у різних природних умовах – лісистій місцевості, степовій зоні та кам'янистому ландшафті; оцінка точності, стабільності та обмежень запропонованого рішення у порівнянні з тепловізорами та інфрачервоними камерами зі штучним інтелектом. Методологія базується на використанні RGB-датчика TCS34725 із вбудованим інфрачервоним фільтром та 16-бітним АЦП у поєднанні з мікроконтролером ESP32, який забезпечує обробку даних у реальному часі, бездротову передачу інформації та автономну роботу. Алгоритм виявлення ґрунтується на формуванні кольорового профілю фону, аналізі відхилень за евклідовою відстанню, нормалізації RGB-значень, медіанній фільтрації та адаптивному пороговому визначенні, що забезпечує стійкість до змін середовища. Результати випробувань показали, що запропонована система здатна з високою точністю ідентифікувати цифровий «піксельний» камуфляж у лісистій місцевості (86 %), камуфляж «мультикам» у степових умовах (78 %) та однотонний оливковий камуфляж на кам'янистому фоні (65 %). Порівняння з тепловізійними та інфрачервоними системами підтвердило значні переваги RGB-рішення за вартістю (менше \$ 20), енергоефективністю та мобільністю, хоча функціонування можливе лише у денний час. У висновках наголошується на доцільності застосування RGB-систем виявлення як економічно вигідного допоміжного інструменту для розвідки та охоронних завдань. Наукова новизна роботи полягає в інтеграції простого й доступного RGB-сенсора з адаптивними алгоритмами моделювання фону та аналізу кольорових відхилень, що дозволяє створювати малопотужні платформи для виявлення камуфляжу. На відміну від традиційних підходів, запропонована система відкриває перспективи розгортання розподіленої мережі дешевих сенсорних вузлів або інтеграції у безпілотні літальні апарати для оперативного моніторингу великих територій.

1. Вступ

Сучасні військові операції вимагають високої ефективності систем спостереження та розвідки, особливо у питаннях виявлення замаскованих об'єктів. Використання камуфляжних технологій, які імітують навколишнє середовище, значно ускладнює виявлення цілей за допомогою традиційних оптичних засобів. В умовах різноманітних природних ландшафтів, таких як ліси, степи або кам'янисті ділянки, камуфляжні покриття можуть ефективно маскувати військову техніку та особовий склад, що створює серйозні перешкоди для розвідки.

На сьогодні основними інструментами виявлення замаскованих об'єктів є тепловізійні прилади та інфрачервоні камери, часто доповнені алгоритмами штучного інтелекту (AI). Ці технології дозволяють ефективно працювати у нічний час та за складних погодних умов, однак характеризуються високою вартістю, значним енергоспоживанням

та обмеженою мобільністю, що ускладнює їх масове застосування в польових умовах. Враховуючи зазначене вище, зростає актуальність розробки доступних, енергоефективних та компактних систем, які працюють у видимому спектрі світла. RGB-сенсори, що аналізують колірні характеристики об'єктів у видимому діапазоні, є перспективною альтернативою для денного виявлення замаскованих цілей. Завдяки простоті конструкції та невисокій вартості такі системи можуть бути інтегровані у мобільні платформи, наприклад, безпілотні літальні апарати або переносні розвідувальні пристрої.

Метою дослідження є розробка та експериментальна оцінка недорогої системи на основі RGB-датчика, призначеної для виявлення камуфляжу у військових умовах. В ході дослідження детально розглянуто особливості конструкції сенсорного модуля, застосовані алгоритми обробки кольорових зображень, а також результати тестування системи в різних природних умовах. Особлива увага приділяється виявленню трьох основних типів камуфляжу: «мультикам», «піксель» та однотонного, які широко використовуються у військовій практиці. Крім того, проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованої системи із традиційними засобами виявлення – тепловізійними приладами та інфрачервоними камерами. з AI. Це порівняння дозволяє виокремити переваги та обмеження RGB-сенсорів у контексті реальних військових задач та сформулювати рекомендації щодо їх подальшого застосування.

2. Аналіз сучасних наукових публікацій і постановка проблеми дослідження

Сучасні технології виявлення замаскованих об'єктів активно розвиваються у напрямку використання глибинного навчання, мультиспектральної обробки зображень та сенсорних систем нового покоління. Основна увага приділяється підвищенню точності, зниженню енергоспоживання та адаптивності алгоритмів до змін середовища. Важливою умовою успішної роботи систем виявлення є стійкість до фонових змін, зокрема варіацій освітлення, текстури та кольору. У роботі [1] було проаналізовано продуктивність сучасних алгоритмів виявлення об'єктів у камуфляжі з використанням багаторівневого злиття ознак. Автори відзначили, що поєднання контекстної інформації з локальними контурами значно підвищує здатність до ідентифікації цілей зі слабким контрастом. В дослідженні [2] запропоновано підхід на основі імітації людського візуального фокусу – система використовує спеціальні модулі фокусування, які «збільшують» ділянки з потенційною аномалією кольору. Така стратегія виявилася ефективною при виявленні малопомітних об'єктів на нерівномірному тлі, що актуально для камуфляжу. Над вирішенням проблеми багатомасштабного аналізу працювали дослідники у [3], де було запропоновано метод агрегації ознак із використанням спеціалізованих блоків орієнтації на межі. Це дозволило суттєво підвищити точність при роботі з об'єктами, які змінюють розміри або форму залежно від ракурсу спостереження. Аналогічно, у роботі [4] розроблено модель, що використовує контурно-орієнтовані фільтри для детектування слабких структур у фонових зображеннях. Для зниження обчислювального навантаження запропоновано полегшені моделі, здатні працювати на мобільних пристроях і у вбудованих системах. Зокрема, в [5] описана система, що базується на поділі зображення на контекстні та текстурні гілки, кожна з яких обробляється окремо з подальшим об'єднанням результатів. Такий підхід дозволив досягти високої швидкості при мінімальних затратах ресурсів, що є критичним у польових умовах. Важливою тенденцією також є інтеграція методів машинного навчання з класичними підходами аналізу RGB-даних. У роботі [6] доведено, що використання адаптивного порогового аналізу у поєднанні з геометричними фільтрами дозволяє суттєво знизити кількість хибних спрацьовувань при виявленні об'єктів, схожих за кольором до фону.

Загалом, огляд підтверджує перспективність розвитку RGB-систем, орієнтованих на

денну експлуатацію. Вони можуть виступати як окремі рішення в умовах обмежених ресурсів або доповнювати мультиспектральні системи. Однак подальше вдосконалення вимагає врахування складних зовнішніх факторів, таких як тінь, зміна освітлення, рух листя тощо. Саме тому інтеграція простих колориметричних методів із адаптивними алгоритмами та машинним навчанням є ключовим напрямом подальших досліджень.

Узагальнення проведеного аналізу показало, що попри значний прогрес у розвитку алгоритмів виявлення замаскованих об'єктів, більшість сучасних рішень залишається енерговитратними та складними для реалізації у мобільних пристроях. Тому актуальною науково-практичною проблемою є створення простої та недорогої RGB-системи для денного виявлення камуфляжу, що забезпечує прийнятну точність за мінімальних ресурсів.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є створення прототипу апаратно-програмної системи виявлення камуфляжу на основі RGB-датчика, з подальшою експериментальною перевіркою у різних природних умовах.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробити структуру апаратної частини системи на базі доступних і недорогих компонентів, забезпечивши її енергоефективність, компактність та можливість автономної роботи.
- розробити алгоритми виявлення аномалій на основі аналізу кольорової інформації в системі координат RGB (Red, Green, Blue), включаючи формування фонових профілів, обчислення відхилень, нормалізацію значень та фільтрацію шумів.
- провести серію тестувань у різних природних умовах (лісові, степові та кам'яні ландшафти) із використанням різних типів камуфляжу.
- оцінити ефективність системи з точки зору точності, швидкодії та стабільності у порівнянні з тепловізорами та інфрачервоними камерами з елементами штучного інтелекту.

4. Матеріали дослідження

Об'єктом дослідження є процес виявлення камуфляжу у видимому спектрі світла за допомогою RGB-датчиків у складі мобільних сенсорних систем.

Предметом дослідження є розробка недорогої оптичної системи на основі RGB-датчика для виявлення замаскованих об'єктів у військовому середовищі.

Основною гіпотезою дослідження є припущення, що навіть недорогі RGB-сенсори здатні забезпечити достовірне виявлення камуфляжу у денних умовах без залучення складних інфрачервоних або мультиспектральних каналів, якщо використати адаптивні методи нормалізації та порогового аналізу кольору.

Методологія реалізації системи базується на використанні дешевого, енергоефективного та доступного обладнання. Основним елементом сенсорної частини є RGB-датчик TCS34725, який забезпечує вимірювання інтенсивності червоного (R), зеленого (G) та синього (B) світла. Цей сенсор має інтегрований інфрачервоний фільтр, що дозволяє зменшити вплив паразитного інфрачервоного випромінювання та підвищити точність вимірювань у денних умовах. Додатково датчик оснащений АЦП високої роздільної здатності (16 біт), що дозволяє отримувати якісні вимірювання кольору [7].

Як обчислювальний модуль обрано ESP32 через його низьке енергоспоживання, вбудовані Wi-Fi і Bluetooth, а також підтримку енергозберігаючих режимів сну [8]. ESP32 зчитує дані з сенсора через інтерфейс I2C, обробляє інформацію в реальному часі, виконує попереднє усереднення, фільтрацію та приймає рішення про виявлення об'єктів. Розроблений мікропрограмний код дозволяє реалізувати фоновий аналіз сцени, тобто формування статистичного образу навколишнього середовища на основі серії вимірювань

RGB. Зібрана інформація зберігається локально на карті пам'яті microSD або передається бездротовими засобами (Wi-Fi, LoRa) до центру обробки [9]. Система може працювати автономно від акумулятора або вбудованого джерела живлення з сонячною панеллю. Реалізація такої платформи дозволяє створювати мережу дешевих сенсорних вузлів для моніторингу великих ділянок території у режимі реального часу [10].

Колориметричний аналіз реалізовано на основі класичної моделі переходу RGB → HSV, яка забезпечує інваріантність до змін освітлення. Для оцінювання ступеня відхилення кольору між поточними та фоновими вимірюваннями застосовано евклідову метрику у просторі RGB. Подальше опрацювання включає фільтрацію шумів медіанним фільтром і нормалізацію значень RGB у відсотковій формі для підвищення стійкості до коливань яскравості. Адаптивне оновлення порогів спрацювання виконується з урахуванням середньої дисперсії фонових сигналів, що дозволяє системі автоматично підлаштовуватись до поточних умов освітлення. Передбачено інтеграцію простих алгоритмів машинного навчання, зокрема k-Nearest Neighbors, для покращення класифікації камуфляжу у складних фонових сценаріях.

5. Алгоритм виявлення камуфляжу

5.1. Концепція та основні етапи алгоритму

Розроблений алгоритм виявлення камуфляжу побудований на аналізі кольорових характеристик поверхонь у режимі реального часу, що фіксуються RGB-датчиком TCS34725. На відміну від багатьох сучасних систем, які базуються на складних моделях комп'ютерного зору або глибинного навчання [11], [13], [14], запропоноване рішення орієнтоване на роботу у простих апаратно-програмних умовах, забезпечуючи низьке енергоспоживання, компактність і можливість автономного функціонування. Завдяки цьому алгоритм може бути інтегрований у мобільні сенсорні вузли або безпілотні платформи, що особливо важливо для оперативного розгортання у польових умовах.

Основна ідея полягає у тому, що будь-який об'єкт, замаскований під навколишнє середовище, рідко забезпечує ідеальну відповідність спектральним характеристикам фону. Навіть мінімальні колірні відхилення можуть бути зафіксовані датчиком і проаналізовані алгоритмом. Процес виявлення відбувається поетапно: формування фонових профілів, нормалізація даних, обчислення вектора відхилення, застосування методів фільтрації та адаптивних порогів, а також перевірка стабільності сигналу.

Послідовність основних етапів алгоритму така:

Етап 1. Ініціалізація системи – калібрування RGB-датчика, задання порогових параметрів T та $T_{\min}$.

Етап 2. Формування фонових профілів – накопичення та усереднення вимірювань RGB-компонентів для побудови еталонного вектора F_0 .

Етап 3. Зчитування поточних даних $F_n = (R_n, G_n, B_n)$.

Етап 4. Нормалізація колірних компонентів R^* , G^* , B^* для компенсації освітленості.

Етап 5. Обчислення евклідової відстані ΔF^* між F_n^* та F_0^* .

Етап 6. Порівняння ΔF^* з порогом T та попереднє виявлення аномалії.

Етап 7. Медіанна фільтрація часової послідовності для усунення шумів.

Етап 8. Перевірка часової стабільності сигналу (аномалія зберігається щонайменше 3 кадри).

Етап 9. Просторова перевірка у локальному вікні 3×3 та підтвердження аномалії.

Етап 10. Виведення результату – позначення виявленої ділянки та передача даних.

Така послідовність етапів дозволяє реалізувати алгоритм на мікроконтролері ESP32 та забезпечує обробку даних у реальному часі навіть за обмежених апаратних ресурсів.

5.2. Формування фонового профілю

На початковому етапі роботи система здійснює автоматичне формування еталонної моделі фону, що виступає опорною базою для подальшого виявлення змін у сцені. Процедура формування профілю передбачає збір серії спектральних вимірювань у просторі RGB з виділеної ділянки спостереження за умов відсутності сторонніх об'єктів; тривалість накопичення вибірки залежить від динаміки середовища і може становити від кількох секунд до декількох хвилин. Отримані значення для кожного вимірювального елемента (пікселя або зони покриття) усереднюються та формують еталонний вектор фонового кольору:

– $F_0 = (R_0, G_0, B_0)$ – еталонне значення кольору (базовий фон);

– $F_n = (R_n, G_n, B_n)$ – поточне вимірювання.

де R_0, G_0, B_0 – середні значення інтенсивностей відповідних каналів за період калібрування. У разі подібної роботи із зонованими вимірами (наприклад, сітка зон покриття) для кожної зони зберігається власний вектор $F_0^{(i)}$.

Формування профілю здійснюється з урахування практичних обмежень: відбір вимірювань має відбуватися у відносно стабільних умовах освітлення, без рухомих об'єктів у полі зору, щоб уникнути артефактів у еталонній моделі.

Профіль може оновлюватися періодично (планове або адаптивне оновлення) для врахування сезонних, добових або погодних трансформацій середовища; при цьому використовується експоненціальне згладжування або ковзне середнє з тривалістю вікна, підбраною експериментально. Формування надійного фонового профілю є критичною складовою, оскільки від його якості напряду залежить чутливість і специфічність системи виявлення [12].

5.3. Формування фонового профілю

Для кількісної оцінки відмінності між поточним вимірюванням $F_n = (R_n, G_n, B_n)$ та еталонним фоновим вектором F_0 використовується відстань у тривимірному нормалізованому кольоровому просторі. Основною метрикою служить евклідова відстань:

$$F = \sqrt{(R_n - R_0)^2 + (G_n - G_0)^2 + (B_n - B_0)^2}. \quad (1)$$

Практично, для підвищення інваріантності до змін освітленості, обчислення виконується над нормалізованими компонентами. Якщо отримане значення ΔF перевищує заздалегідь встановлений поріг чутливості T , то відповідна точка або зона позначається як потенційно аномальна (підсумкова детекція залежить від додаткових часово-просторових критеріїв і фільтрації).

Порогове значення T може бути задане двома способами: фіксовано – після попереднього калібрування під конкретні експлуатаційні умови; адаптивно – з урахуванням статистичних характеристик фонового профілю (наприклад, через множення стандартного відхилення фонового сигналу на емпіричний коефіцієнт). Адаптивна постановка дозволяє зберігати прийнятний баланс між чутливістю та стійкістю у довільних ландшафтах або при зміні погодних умов [14].

5.4. Нормалізація значень

Оскільки абсолютні інтенсивності каналів R, G, B сильніше за все залежать від рівня освітлення, у системі реалізовано нормалізацію кольорових компонентів у відносній пропорції:

$$R^* = \frac{R}{R+G+B}; \quad G^* = \frac{G}{R+G+B}; \quad B^* = \frac{B}{R+G+B}, \quad (2)$$

де R^* , G^* , B^* – нормалізовані компоненти кольору. У нормалізованому просторі евклідова відстань (1) набуває вигляду:

$$F^* = \sqrt{(R_n^* - R_0^*)^2 + (G_n^* - G_0^*)^2 + (B_n^* - B_0^*)^2}, \quad (3)$$

що дозволяє оцінювати відхилення кольорів незалежно від загальної інтенсивності освітлення. Така нормалізація вилучає вплив глобальної яскравості та зосереджує аналіз на співвідношенні компонент, що є релевантнішим при відокремленні колірних тонів. Нормалізовані компоненти використовуються у подальших обчисленнях (зокрема у формулі (3) для ΔF^* , що істотно зменшує кількість помилкових детекцій, пов'язаних із загальними коливаннями освітлення (наприклад, перехід від сонячної погоди до часткового покриття хмарами) [13].

Під час нормалізації доцільно контролювати випадки близьких до нуля сум каналів ($R+G+B \approx 0$) і застосовувати регуляризацію або мінімальні пороги по яскравості для уникнення чисельної нестабільності.

5.5. Виявлення кольорових аномалій

У межах запропонованої системи виявлення кольорових аномалій ґрунтується на поєднанні спектрального критерію з часово-просторовою валідацією результатів. Первинна оцінка відхилення здійснюється за евклідовою відстанню ΔF^* у нормалізованому просторі (3). Якщо це відхилення перевищує порогове значення T , фіксується потенційна аномалія. Для умов польових випробувань було встановлено робоче значення $T=0,15$, однак у разі складних фонів або змін освітленості поріг може обчислюватися адаптивно.

Для того, щоб уникнути реакції на випадкові та короточасні збурення, такі як відблиски або рух листя, було введено часовий критерій стабільності. Аномалія вважається істотною лише тоді, коли відхилення зберігається протягом певної кількості вимірювань (наприклад, не менше трьох кадрів) або мінімального інтервалу часу T_{min} . Таким чином система ігнорує шумові коливання та реагує лише на сталі об'єкти.

Додатковим рівнем перевірки є просторове підтвердження. Для того, щоб уникнути помилкових спрацювань на одиничні пікселі, відхилення має бути виявлене відразу в кількох суміжних елементах, наприклад, у локальному вікні розміром 3×3 . Лише у випадку, якщо кількість сусідніх відхилених точок перевищує певний мінімум, система підтверджує наявність аномалії. Така комбінація спектрального, часового та просторового критеріїв дозволяє значно знизити кількість хибнопозитивних детекцій і забезпечує стабільну роботу навіть у змінних природних умовах [11]-[14].

Для підвищення ефективності аналізу можуть також застосовуватись інші колірні простори, зокрема HSV або CIELAB. Вони краще відображають перцептивні особливості зору людини та дозволяють чіткіше виокремлювати відмінності у відтінках при схожих рівнях яскравості [12].

5.6. Математичні та алгоритмічні засоби

У перспективі система може бути вдосконалена за рахунок впровадження методів машинного навчання. Зокрема, можливо використання алгоритмів k -найближчих сусідів (k -NN) або методу опорних векторів (SVM — один із базових алгоритмів машинного навчання для розділення класів) для точнішої класифікації фонових і нефонових пікселів. Такі моделі можуть навчатися на підготовлених вибірках і краще адаптуватися до нових або складних сцен [18].

Алгоритмічна частина системи побудована так, щоб поєднати простоту реалізації з достатньою стійкістю до шумів. На першому кроці застосовується ковзне середнє для згладжування повільних змін у часових рядах, а також медіанна фільтрація у вікні з п'яти

вимірювань, яка ефективно усуває імпульсні викиди і водночас зберігає контурні характеристики [15], [16]. У результаті формується стабільніший потік даних для подальшої обробки.

Наступним кроком у процесі аналізу відхилень є визначення порогів відхилення. У запропонованій системі використано адаптивний підхід, коли значення T змінюється залежно від дисперсії фонових профілів. Це дозволяє автоматично підлаштовувати чутливість системи до різних умов сцени: підвищувати поріг у шумних ділянках і знижувати його в однорідних. Класифікація пікселів (або зон спостереження) як фонових здійснюється шляхом обчислення ΔF^* та перевірки його відносно порогового значення. Такий метод є обчислювально простим, тому може виконуватися у реальному часі навіть на малопотужних мікроконтролерах [17].

У перспективі передбачається розширення алгоритмічної частини за рахунок впровадження методів машинного навчання. Зокрема, можливим є використання класифікаторів k -NN або SVM, які здатні навчатися на експериментальних даних та покращувати якість відокремлення фону від об'єктів. Проте у поточному прототипі ці методи не застосовувалися, оскільки головним завданням було створення максимально простої та енергоефективної системи [18].

5.7. Особливості роботи з камуфляжем

Камуфляжні засоби спрямовані на наближення кольорових і текстурних характеристик об'єкта до навколишнього середовища; втім, ідеальної відповідності досягти неможливо, тому при коректній обробці сигналу такі зразки можна виявити. У запропонованій системі аналіз здійснюється в нормалізованому кольоровому просторі RGB – тобто на основі відстані ΔF^* між поточним та фоновим векторами – та доповнюється просторовим і текстурним аналізом.

Перший тип ознак, на якій орієнтується алгоритм, – локальні контурні розбіжності: у місцях переходу «об'єкт–фон» спостерігаються різкі градієнти кольору або яскравості, які проявляються як локальні підвищення ΔF^* і корелюють з високою величиною градієнта інтенсивності.

Другий тип ознак – текстурні відмінності: штучні візерунки зазвичай мають інші локальні статистики (наприклад, інші значення другого або третього моменту, іншу енергію у високочастотній частині спектра), що дозволяє відокремити повторювані штучні патерни від природних текстур.

Третій тип – спектральні «чужорідні» вкраплення, які виникають при використанні синтетичних барвників або матеріалів; такі вкраплення дають локальні аномалії у нормалізованих відтінках і можуть бути виявлені як стійкі точки або малі області з підвищеним ΔF^* .

Для посилення надійності детекції колориметричний аналіз комбінується з просторовими фільтрами та просторово-частотними статистиками; у складних випадках доцільне залучення додаткових каналів (наприклад, інфрачервоного або мультиспектрального діапазону), що істотно підвищує ймовірність виявлення. Практично, параметри алгоритму (поріг T , мінімальна площа кластера, локальний поріг на текстурну енергію) підбираються експериментально для кожного типу місцевості; також слід враховувати обмеження апаратури (чутливість датчика, дальність спостереження, робочі умови освітлення) і включати в протокол калібрування відповідні тестові сценарії.

6. Результати натурних випробувань

6.1. Загальні особливості натурних випробувань

Після створення дослідного зразка системи було проведено серію натурних випробувань у різних природних умовах з метою перевірки точності виявлення

камуфльованих об'єктів і стійкості алгоритму до зовнішніх чинників. Експерименти здійснювалися у трьох типах місцевості: листяний ліс, відкрита степова зона та кам'яниста місцевість. Для кожного середовища моделювалися умови наявності камуфляжних елементів, максимально наближених за кольоровими характеристиками до фону.

Випробування проводилися згідно з алгоритмом, описаним у розділі 5: нормалізація RGB -компонентів у відсотковій формі, обчислення вектора кольорового відхилення ΔF^* , використання порога чутливості $T=0,15$ у нормованій шкалі, медіанна фільтрація у часовому вікні з п'яти кадрів і перевірка часової стабільності відхилення протягом мінімум трьох послідовних кадрів.

Для забезпечення відтворюваності параметри середовища були стандартизовані. Спостереження проводилися лише у денний час (10:00–16:00), коли природне освітлення характеризується найвищою стабільністю. Умови освітлення обмежувалися відсутністю хмарності, опадів або туману, щоб виключити додаткові флуктуації фону. Дистанція між датчиком і цільовим об'єктом змінювалася в межах 1–3 м, що відповідає ближнім умовам розвідки.

Кожна серія експериментів включала 100 тестових циклів спостереження. У кожному циклі аналізувалося 300 кадрів із роздільною здатністю 640×480 пікселів. Камуфльовані об'єкти займали у середньому 10–20 % площі кадру. У системі реєструвалися три типи результатів: істинно-позитивне виявлення (об'єкт присутній і система його правильно зафіксувала), хибнопозитивне спрацювання (система сигналізувала за відсутності об'єкта, False Positive, FP) та пропуск (об'єкт присутній, але система його не виявила).

В експерименті використовувалися такі типи камуфляжу:

- «мультикам» (MultiCam) – універсальний багатоспектральний камуфляжний візерунок, адаптований для ефективного маскуванню в широкому діапазоні ландшафтів, зокрема у пустельних, лісових та урбанізованих середовищах;

- «піксель» – маскувальний шаблон із виразною піксельною структурою, створений на основі принципів цифрової дискретизації зображення, що сприяє розмиттю контурів об'єкта в полі зору спостерігача;

- однотонний оливковий камуфляж – монохромний варіант маскуванню, призначений переважно для експлуатації в середовищі з щільною лісовою рослинністю, де переважають зелені тони спектру.

Зібрані дані фіксувалися для подальшого статистичного аналізу. Точність виявлення обчислювалася як відсоткове співвідношення правильно зафіксованих об'єктів до загальної кількості спроб, згідно з методикою, наведеною у підрозділі 6.2.

6.2. Методика випробувань

Методику випробувань було побудовано на основі алгоритмічної схеми, описаної в розділі 5.

Кожен експериментальний сценарій складався зі 100 кадрів, усього для кожного типу камуфляжу проведено 5 серій (загалом 500 спостережень).

Обробка даних проводилася у такій послідовності.

Крок 1. Нормалізація RGB -значень у відсотковій формі;

Крок 2. Обчислення відхилення ΔF^* від фонового профілю;

Крок 3. Використання порога чутливості $T=0,15$ у нормалізованій шкалі RGB з можливістю адаптації $\pm 0,05$ залежно від освітлення;

Крок 4. Медіанна фільтрація у часовому вікні з 5 кадрів для приглушення шумів;

Крок 5. Умова часової стабільності: відхилення мало зберігатися щонайменше протягом $T_{min}=3$ послідовних кадрів.

Точність було визначено за класичними метриками [12]–[15]:

$$Accuracy = \frac{TP}{TP + FN + FP} \times 100\%, \quad (4)$$

де TP – кількість істинно-позитивних спрацювань (зона аномалії збігалася з фактичним розташуванням об'єкта, підтвердженням візуально); FN – кількість пропусків; FP – хибнопозитивні спрацювання.

Наприклад, у випадку з цифровим камуфляжем «піксель» у лісі із 100 тестів 86 були правильно ідентифіковані системою, 11 – пропущені, а 3 – хибнопозитивні. Наведені за результатами дослідження значення (86 %, 78 %, 65 %) відповідають середнім результатам, отриманим за формулою (4) для сукупності всіх серій. Таким чином, точність становила:

$$Accuracy = \frac{86}{86 + 11 + 3} \times 100\% \approx 86\%. \quad (5)$$

Результати експериментальних досліджень зведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень з виявлення камуфляжу

Тип камуфляжу	Фон	Виявлення, %	Хибні спрацювання, %
«Піксель»	листяний ліс	86 %	7 %
«Мультикам»	відкрита степова зона	78 %	11 %
Однотонний	кам'яниста зона	65 %	13 %

Найвищу ефективність система показала при виявленні камуфляжу типу «піксель» у листяному лісі. Це пояснюється кращим контрастом дрібномасштабної структури пікселя зі статистичним фоном, що фіксується RGB-датчиком. Тип «мультикам», адаптований під широкий спектр природних умов, виявився складнішим для розпізнавання у відкритій степовій зоні через близькість колірного профілю до середовища. Найгірші результати спостерігалися у випадку однотонного камуфляжу на кам'янистому фоні. Відсутність різких контрастів і варіативна колірна структура фону знижували ефективність алгоритму виявлення, заснованого лише на RGB-аналізі.

Порівняльний аналіз технічних характеристик трьох типів систем виявлення об'єктів (табл. 2) демонструє, що запропонована система суттєво переважає за показниками вартості, енергоефективності та мобільності, хоча поступається альтернативним рішенням у можливості нічного функціонування.

Як видно з таблиці 2, запропонована система виявлення кольорових аномалій на основі RGB-датчика демонструє низку суттєвих переваг у порівнянні з традиційними технологіями, такими як тепловізори та інфрачервоні камери з елементами штучного інтелекту. Найочевиднішою перевагою є надзвичайно низька вартість (< \$ 20), що робить можливим масове впровадження такої системи у військових або охоронних застосуваннях із обмеженим бюджетом.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз технічних характеристик систем виявлення об'єктів

Параметр	Запропонована система	Тепловізор	Інфрачервона камера + AI
Вартість	< \$ 20	> \$ 1000	> \$ 300
Споживання енергії	дуже низьке	високе	середнє
Робота вночі	ні	так	так
Мобільність	висока	середня	середня
Залежність від погодних умов	помірна	висока	помірна

Важливою є також мінімальна енергозалежність, що дає змогу використовувати систему у мобільних або автономних застосуваннях, зокрема у безпілотних платформах або сенсорних сітках. Хоча запропонована система не функціонує у нічний час за відсутності зовнішніх джерел освітлення, її ефективність у денний час при стабільних погодних умовах є достатньою для виконання завдань виявлення камуфляжних об'єктів у ближній зоні.

За мобільністю запропонована система значно перевершує більшість аналогів завдяки мініатюрним габаритам та низькому енергоспоживанню, що розширює спектр можливих сценаріїв застосування. Хоча залежність від погодних умов залишається помірною, вона є прийнятною в контексті задач денного моніторингу при хорошій видимості.

7. Обговорення результатів дослідження

Експериментальні дослідження підтвердили, що ефективність запропонованої RGB-системи істотно залежить від типу камуфляжу та фонового середовища. Найвищий показник точності (86 %) отримано для цифрового камуфляжу в умовах листяного лісу; нижчий результат (78 %) – для «мультикама» у степовій зоні; мінімальне значення (65 %) зафіксовано для однотонного камуфляжу на кам'янистій місцевості. Наведені значення точності відповідають усередненим результатам серій експериментів, описаних у підрозділі 6.3. Середній рівень FP становив 3-7 %.

Зміни в освітленні (перехід від прямого сонячного до частково хмарного) та поява локальних тіней збільшували кількість FP, що свідчить про потребу в удосконаленні адаптивних механізмів компенсації освітленості. Порівняння з тепловізорами та інфрачервоними камерами показало: запропонована система значно дешевша (вартість сенсорного вузла становить < 5 % від вартості інфрачервоної камери), споживає у 8-10 разів менше енергії й має меншу масу, але обмежена роботою у видимому діапазоні [20]-[22].

Попри задовільні показники точності, система має низку обмежень. Вона не функціонує у нічний час, залежить від рівня природного освітлення та чутливості сенсора до змін температури. Крім того, дальність дії обмежена кількома метрами, що зумовлено оптичними характеристиками датчика TCS34725.

Отримані результати підтверджують, що RGB-системи доцільно застосовувати як складову багатоспектральних платформ у завданнях ближнього виявлення при обмежених ресурсах.

8. Висновки

У ході роботи розроблено прототип апаратно-програмної системи виявлення камуфляжу на основі RGB-датчика. Структура системи побудована з використанням доступних компонентів – сенсора TCS34725 із вбудованим інфрачервоним фільтром і мікроконтролера ESP32. Така конфігурація забезпечила низьке енергоспоживання,

компактність та можливість автономної роботи в польових умовах.

Розроблено алгоритм виявлення кольорових аномалій у просторі RGB, який включає формування фонових профілю, нормалізацію колірних компонентів, обчислення вектора відхилення ΔF^* , медіанну фільтрацію та адаптивне порогове визначення. Застосування адаптивного підходу дало змогу підвищити стійкість системи до змін освітлення та зменшити кількість FP.

Проведено натурні випробування у трьох типах фонових середовищ — лісовому, степовому та кам'янистому. Результати показали, що точність виявлення камуфляжу становить: 86 % для цифрового «піксельного» камуфляжу, 78 % для «мультикаму» та 65 % для однотонного оливкового. Отримані дані підтверджують працездатність запропонованої системи у денних умовах і при стабільному освітленні.

Порівняння з тепловізійними та інфрачервоними системами показало, що запропоноване RGB-рішення має істотні переваги за вартістю, енергоефективністю та мобільністю, однак обмежене роботою у видимому діапазоні. Система не функціонує у нічний час та є чутливою до різких змін освітлення, що визначає напрями подальшої оптимізації.

У подальшому передбачається інтеграція інфрачервоних каналів і перевірка системи на більших відстанях та за змінних умов освітлення.

Перелік посилань:

1. Sun Y., Chen G., Zhou T., Zhang Y., Liu N. Context-aware Cross-level Fusion Network for Camouflaged Object Detection (C2F Net). *Proceedings of the 30th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21)*. 2021. С. 1025–1031. URL: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2021/142>.
2. Jiang X., Cai W., Zhang Z., Jiang B., Yang Z., Wang X. MAGNet: Camouflaged Object Detection Network Simulating the Observation Effect of a Magnifier. *Entropy*. 2022. Vol. 24, № 12. С. 1804. URL: <https://doi.org/10.3390/e24121804>.
3. Sun Y., Wang S., Chen C., Xiang T.-Z. Boundary-Guided Network (BGNet) for Camouflaged Object Detection. *arXiv preprint*. URL: <https://arxiv.org/abs/2207.00794> (дата звернення: 15.07.2025).
4. Ji G.-P., Fan D.-P., Chou Y.-C. et al. Deep Gradient Learning for Efficient Camouflaged Object Detection (DGNNet). *Machine Intelligence Research*. 2023. Vol. 20. p. 92–108. URL: <https://doi.org/10.1007/s11633-022-1365-9>.
5. Zheng D., Zheng X., Yang L.T. et al. MFFN: Multiview Feature Fusion Network for Camouflaged Object Detection. *arXiv preprint*. URL: <https://arxiv.org/abs/2210.06361> (дата звернення: 15.07.2025).
6. Guo Y., Huang H. CLAD: Contrastive Learning and Data Augmentation for Camouflaged Object Detection. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 6. p. 2581. URL: <https://doi.org/10.3390/s24062581>.
7. Popa A., Botezatu N., Moraru L. Development of a Colorimetric Sensor for Autonomous, Networked, Real-Time Application. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 20. p. 5857. URL: <https://doi.org/10.3390/s20205857>.
8. Hakim G.P.N., Darmawan A., Fadillah M. Benchmarking In Microcontroller Development Board Power Consumption For Low Power IoT WSN Application. *Jurnal Teknologi Elektro dan Komputer*. 2022. Vol. 11, № 2. p. 105–112. URL: <https://doi.org/10.31294/jtekin.v11i2.12546>.
9. Paredes M., Gamarra A., Alvarado J. Prototype of an IoT-Based Low-Cost Sensor Network for Hydrological Monitoring in Remote Areas. *Sensors*. 2023. Vol. 23, № 3. p. 1340. URL: <https://doi.org/10.3390/s23031340>.
10. Hermawan R.A., Purwanto A. Smart Home Monitoring System Using ESP32 Microcontrollers. *IntechOpen*. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/77491> (дата звернення: 15.07.2025).
11. Yan L.Y., Xu X.Q., Zhang M., Luo S.X. Enhanced Spatio-Temporal Attention Mechanism for Video Anomaly Event Detection. *Advances in Computer Engineering*. 2025. Vol. 117. URL: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20838>.
12. Li Y., Liu H., Wang Y. Evaluation of Color Anomaly Detection in Multispectral Images Using Statistical Thresholding. *Engineering*. 2023. Vol. 3, № 4. p. 541–553. URL: <https://doi.org/10.3390/eng3040038>.
13. Zhao Y., Li C., Zhang J. Improved Spatio-Temporal Graph Convolutional Networks for Fine-Grained Video Anomaly Detection. *Opto-Electronic Engineering*. 2024. Vol. 51, № 2. Article ID: 240034. URL: <https://doi.org/10.12086/oe.2024.240034>.
14. Tran M., Nguyen T. Deep BiLSTM Attention Model for Spatial and Temporal Anomaly Detection in Surveillance Videos. *Sensors*. 2025. Vol. 25, № 1. Article № 251. URL: <https://doi.org/10.3390/s25010251>.

15. Romero-González G., Santana-Cedrés D., Díaz-Díaz N., Lorenzo-Navarro J. Background Subtraction for Dynamic Scenes Using Gabor Filter Bank and Statistical Moments. *Algorithms*. 2024. Vol. 17, № 4. Article № 133. URL: <https://doi.org/10.3390/a17040133>.
16. Pambudi S., Wahyudi I., Astuti N.I. Impact of Wolf Thresholding on Background Subtraction for Human Motion Detection. *Compiler*. 2024. Vol. 13, № 1. p. 37–45. URL: <https://doi.org/10.28989/compiler.v13i1.2116>.
17. Minaee S., Boykov Y., Porikli F., Plaza A., Kehtarnavaz N., Terzopoulos D. Image Segmentation Using Deep Learning: A Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2022. Vol. 44, № 7. p. 3523–3542. URL: <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3059968>.
18. Li X., Wang Y., Yang J., Zhou Y., Li Z. Transformer-Based Visual Segmentation: A Survey. *arXiv preprint*. 2023. arXiv:2304.09854. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.09854>.
19. Хорошайло Ю. Є., Семенов С. Г., Лимаренко В. В. Цифровий датчик для вимірювання кольору : пат. на корисну модель 107317 Україна; ХНУРЕ. 2016.
20. BOSON® LWIR OEM Thermal Camera Module Datasheet. *Teledyne FLIR*. URL: <https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/20335613/flir-boson-datasheet.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
21. FLIR Lepton® Series Datasheet (Lepton 3 / 3.5). *Teledyne FLIR*. URL: https://d3mm496e6885mw.cloudfront.net/manufacture/product/652edc2b527692120f62e958/specsheet/spec_sheets/original/LeptonSeriesDatasheet1.pdf (дата звернення: 15.07.2025)
22. MLX90640 32×24 IR Array Datasheet. *Melexis*. URL: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx90640-datasheet-melexis.pdf> (дата звернення: 15.07.2025)

Надійшла до редколегії 10.09.2025 р.

Крицький Дмитро Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету літакобудування, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: d.krickiy@khai.edu, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4919-0194>.

Оніщук Денис Анатолійович, аспірант кафедри ІВТ ХНУРЕ, м. Харків, Україна, e-mail: denys.onishchuk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3080-7710>.

Валюженич Олександр Олексійович, аспірант кафедри ІВТ, ХНУРЕ, Харків, Україна, e-mail: oleksandr.valiuzhenych@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3695-1658>.