

А. О. Подорожняк, О. В. Скорлупін

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ВИЯВЛЕННЯ МІН ЗА ДОПОМОГОЮ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Актуальність. Виявлення мін за допомогою робототехнічних систем із використанням мультиспектральних відеозображень зумовлено критичною потребою в безпечних, ефективних та високоточних методах розмінування постконфліктних територій, де традиційні підходи не забезпечують достатньої швидкості й надійності виявлення вибухонебезпечних об'єктів. **Об'єкт дослідження:** процес дистанційного пошуку та виявлення протипіхотних та протитанкових мін, здійсненого за допомогою робототехнічних комплексів, які використовують комп'ютерний зір у видимому та тепловому діапазонах. **Мета статті:** розробка методології багатоспектрального аналізу простору, яка базується на синергії просторових, структурних (текстурних) та теплових характеристик об'єктів. **Результати дослідження.** У статті проаналізовано детально фізичну природу формування відмінностей у видимості (контрасту) між вибуховим пристроєм та його оточенням, принципові схеми конфігурації сенсорного обладнання, алгоритмічні етапи опрацювання відеопотоку в бортовій комп'ютерній системі у межах оперативних часових рамок, а також ступінь впливу зовнішніх умов на результативність ідентифікації. Встановлено, що спільне використання інформації з RGB-камер та тепловізорів (RGB-ІЧ злиття) забезпечує значне покращення частки коректно виявлених цілей у несприятливих умовах спостереження. **Висновки.** Представлені дані свідчать про вагомий потенціал застосування безпілотних наземних та літальних апаратів мультиспектрального моніторингу для проведення операцій з гуманітарного розмінування. Сфера використання отриманих результатів: мобільні робототехнічні системи мультиспектрального виявлення вибухонебезпечних об'єктів.

Ключові слова: виявлення мін; робототехнічна система; мультиспектральне зображення; комп'ютерний зір; комп'ютерна система; RGB-ІЧ злиття; гуманітарне розмінування.

Вступ. Постановка задачі

Замінування територій залишається однією з найбільш затяжних і важких за наслідками загроз, що триває роками та десятиліттями після припинення активних боїв. Ділянки землі, забруднені небезпечними вибуховими пристроями, накладають суттєві обмеження на відновлення транспортних, енергетичних і житлових комунікацій, унеможливають повноцінне використання сільськогосподарських площ і є постійним джерелом ризику для мирного населення [1]. За прогнозами міжнародних інституцій, повне очищення значних територій від мінних зарядів та боєприпасів що вибухнули може зайняти десятиліття, навіть за умови застосування передових технологій та значних фінансових вкладень [2].

Окрім прямих людських жертв, мінна загроза тягне за собою довготривалі соціально-економічні проблеми. Забруднення територій вибухонебезпечними предметами фактично виводить ці землі з господарського обігу, що спричиняє погіршення стану ґрунтів, зменшення обсягів виробництва їжі та змушення людей до переселення. Відновлення таких регіонів вимагає не просто механічного звільнення території від небезпеки, але й налагодження стійких систем моніторингу та контролю, здатних запобігти повторному виникненню загроз. Саме тому своєчасне виявлення небезпечних об'єктів набуває першорядного значення на етапі планування заходів з гуманітарного розмінування.

Класичні методи знешкодження мін, що ґрунтуються на ближньому пошуку саперними підрозділами з використанням ручного інструментарію або приладів для виявлення металу, залишаються вкрай ризикованими та вимагають багато часу. Необхідність присутності фахівця безпосередньо у зоні за-

грози суттєво уповільнює темпи роботи та збільшує ймовірність нещасних випадків. Навіть застосування механізованих установок чи захищеної техніки не спроможне повністю прибрати всі ризики. У світлі цього, дистанційні методи пошуку, які дозволяють проводити первинну розвідку місцевості без прямого залучення людини до небезпечного середовища, стають усе більш актуальними [3].

Одним із найбільш перспективних шляхів розв'язання цієї проблеми є впровадження різноманітних роботизованих комплексів, включно з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) та безпілотними наземними апаратами (БПНА). Такі системи здатні обстежувати великі площі, працювати у важкодоступній місцевості та передавати дані оператору у режимі реального часу. Їхня результативність значною мірою залежить від характеристик сенсорів, якими вони оснащені. Оптична апаратура, що оперує у видимому та інфрачервоному спектрах, може бути одним з найбільш доступних та універсальних засобів для дистанційного зондування поверхні, оскільки не потребує контакту з ґрунтом і забезпечує високу деталізацію просторових даних [4].

Зображення у видимому діапазоні дає змогу оцінити габарити об'єктів, їхній колір, текстуру та взаємне розташування елементів сцени, тоді як інфрачервоне випромінювання фіксує теплові характеристики поверхні та дозволяє ідентифікувати приховані або замасковані аномалії. Проте використання лише одного спектрального каналу не гарантує високої надійності виявлення у реальних польових умовах, де суттєво впливають такі фактори, як освітленість, наявність рослинності, вологість ґрунту та інші зовнішні змінні. Це створює потребу у мультиспектральному підході, який інтегрує інформацію з різних джерел, забезпечуючи більш повне розуміння обстежуваної картини рис. 1.



Рис. 1. Структурна схема системи

Фізичні та технічні основи мультиспектрального виявлення мін

Визначення характеристик, які дозволяють розпізнати міну, зумовлене складним сплетінням фізичних явищ. Візуальне представлення видимого та інфрачервоного діапазонів у загальному електромагнітному випромінюванні представлено на рис. 2.

У видимому діапазоні світла ключовим елементом даних є відбиття сонячної енергії. Протипіхотна міна може проявлятися через локальні зміни рельєфу ґрунту, або ж зміну його кольорових чи фактурних властивостей на поверхні. Однак, зброя, що використовується нині, нерідко створюється з компонентів, які майже не відрізняються від оточення, або ж піддається цілеспрямованому камуфлюванню [5].

Теплове випромінювання нижнього діапазону безпосередньо залежить від температури поверхні та її здатності випромінювати тепло. Присутність стороннього елемента порушує теплову рівновагу ділянки внаслідок розбіжностей у питомій теплоємності, здатності проводити тепло та тепловій стійкості матеріалів [6, 7].

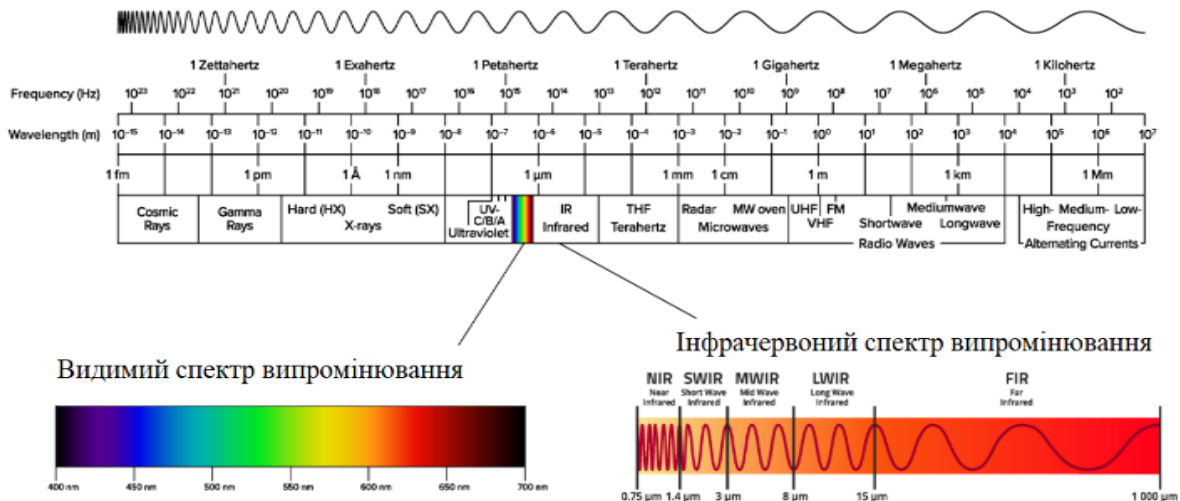


Рис. 2. Візуальне представлення видимого та інфрачервоного діапазонів

Навіть якщо сам об'єкт знаходиться під землею поверхнею, він здатний викликати появу температурного зміщення, яке стає помітним на верхньому шарі ґрунту.

Величина різниці температур обумовлена низкою обставин, серед яких глибина розташування, насиченість ґрунту водою, густина рослинного покриву та метеорологічні умови.

Найбільш помітними відхилення в температурі стають тоді, коли поверхневі шари ґрунту швидко змінюють свій тепловий режим – у час одразу після світанку або безпосередньо перед заходом сонця рис. 3.

Метод одночасного аналізу багатьох спектрів передбачає зведення до купи оцінки просторових і теплових ознак сцени.

Це дає змогу усунути обмеження, властиві кожному окремому інформаційному потоку [8, 9], і тим самим збільшити шанси на ідентифікацію об'єктів з різними властивостями рис. 4.

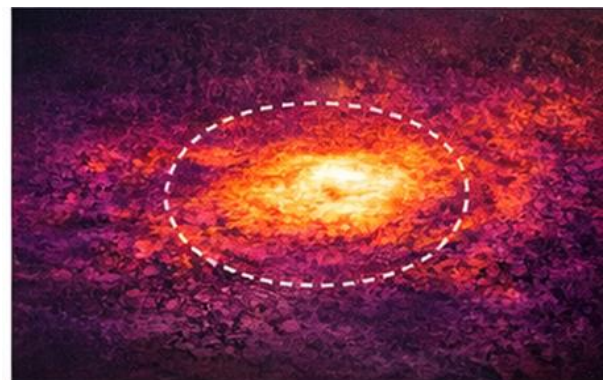


Рис. 3. Термографічне зображення міни

Архітектура робототехнічної системи та обробка відеоданих

Типова апаратура для дистанційного пошуку мін складається з блоку сенсорів, підсистеми

обробки даних, апаратури орієнтування та засобу комунікації із залученим фахівцем [10].

Фотоапарати, що працюють у різних частинах спектра, розміщуються таким чином, аби їхні поля огляду мали спільні зони та дозволяли одночасну фіксацію зображень [11].

Відеодані підлягають попередній обробці, яка може охоплювати стабілізацію візуального ряду, усунення викривлень форми, відсіювання завад та приведення рівня освітлення до стандартного. Після цього відбувається об'єднання інформації з усіх джерел та автоматизоване дослідження отриманих кадрів [12].

Методи виявлення можуть ґрунтуватися як на традиційних підходах комп'ютерного зору, так і на моделях на базі нейронних мереж, придатних для функціонування у реальному часі [13]. Виявлені предмети прив'язуються до просторових координат, і отримані відомості згодом можуть бути надіслані фахівцю або застосовані для формування плану потенційно небезпечних територій рис. 5.



Рис. 4. Робототехнічна платформа



Рис. 5. Схема об'єднання RGB та IR зображень

Невід'ємною частиною апаратури є механізм геопросторового прив'язування, що дає змогу приписати результати розпізнавання до географічних координат та включити їх у геоінформаційні системи [14].

Результати досліджень та вплив умов середовища

Ступінь успішності знаходження мін та інших вибухонебезпечних об'єктів, зокрема нерозірваних летальних боєприпасів, що не спрацювали після застосування і залишаються потенційно небезпечними (НЛБО), істотно зумовлений умовами спостереження [15]. Випробування у реальних умовах доводять, що використання лише інформації з RGB-каналу часто призводить до значної кількості пропусків, особливо у випадках маскуванія об'єктів або низького контрасту з фоном. Інфрачервоний діапазон дозволяє виявляти частину таких предметів за рахунок температурних відмінностей, однак його ефективність знижується за несприятливих погодних умов або незначного теплового контрасту [16].

Поєднання обох методів аналізу демонструє найбільш надійні результати, оскільки дає змогу враховувати різні типи інформативних ознак. Навіть якщо об'єкт не має виражених візуальних

характеристик, його можна зафіксувати за наявністю локальної температурної аномалії, і навпаки рис. 6.



Рис. 6. Приклади детекції

На кінцеві показники також чинять вплив склад ґрунту, ступінь зволоження, наявність рослинності та конфігурація ландшафту. Скажімо, зволожений ґрунт володіє більшою теплоємністю, що здатно знижувати контрастність [17]. Густи рослинний шар створює перешкоди як для оптичного, так і для теплового моніторингу рис. 7.

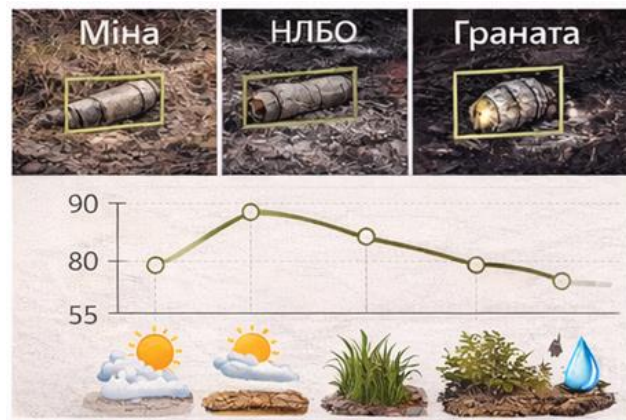


Рис. 7. Залежність точності від зовнішніх умов

Під точністю виявлення у даному дослідженні розуміється ступінь відповідності результатів автоматичної ідентифікації фактичній наявності вибухонебезпечних об'єктів на обстежуваній території, що кількісно оцінюється за допомогою стандартних метрик бінарної класифікації [18]. Нехай ТРТРП – кількість істинно позитивних спрацювань (коректно виявлених об'єктів), ТНТНТН – істинно негативних результатів, FPFPFP – хибно позитивних спрацювань, а FNFNFN – хибно негативних результатів (пропущених об'єктів). Тоді:

$$\text{загальна точність} - \text{Acc} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN};$$

$$\text{прецизійність (Precision)} - \text{Prec} = \frac{TP}{TP+FP};$$

$$\text{повнота або чутливість (Recall)} - \text{Rec} = \frac{TP}{TP+FN};$$

$$\text{гармонічна оцінка якості} - \text{F1} = 2 \cdot \frac{\text{Prec} \cdot \text{Rec}}{\text{Prec} + \text{Rec}}.$$

У задачах дистанційного виявлення мін та нерозірваних боєприпасів пріоритетним показником є саме Recall, оскільки пропуск небезпечного об'єкта створює значно більший ризик, ніж помилкове спрацювання системи. Для комплексної оцінки здатності алгоритму відокремлювати ціль від фону додатково застосовується площа під ROC-кривою (ROC-AUC), що характеризує якість класифікації при варіюванні порогу прийняття рішення.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Отримана у процесі роботи інформація демонструє, що роботизовані комплекси, здатні працювати

у кількох спектрах, слугують дієвим засобом для дистанційного знаходження вибухонебезпечних предметів. Злиття даних візуального ряду, отриманих як у видимому, так і в інфрачервоному діапазонах, дає змогу формувати більш ґрунтовне уявлення про об'єкт розвідки, що підвищує імовірність виявлення у типових польових ситуаціях.

Отримані висновки підтверджують слушність застосування подібних апаратно-програмних рішень для початкового огляду місцевості перед тим, як розпочинати операції з гуманітарного розмінування. Наступні етапи наукового пошуку варто зосередити на відшліфуванні способів об'єднання інформації з різних датчиків, збільшенні незалежності функціонування рухомих платформ, а також адаптуванні програмних засобів до змінних умов їхнього застосування.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. International Mine Action Standards (IMAS). United Nations Mine Action Service, 2023, 23 p. URL: https://www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/TEP_09.10.01.2023_Ed.1.pdf.
2. Habib, M. K. (2007). "Humanitarian Demining: Reality and the Challenge of Technology – The State of the Arts," International Journal of Advanced Robotic Systems, 2007, 4(2), doi: <https://doi.org/10.5772/5699>.
3. Gonzalez, R. C., Woods, R. E. (2018). "Digital Image Processing," 4th ed., Pearson, 2018, 1022 p. URL: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/digital-image-processing/P200000003224/9780137848560>
4. Szeliski, R. (2022). "Computer Vision: Algorithms and Applications," Springer, 2022, 925 p., doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9>.
5. Murphy, R. R. (2014). "Disaster Robotics," MIT Press, 2014, 224 p., doi: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9407.001.0001>.
6. Deans, J., Gerhard, J., & Carter, L. J. (2006). "Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface," Infrared Physics & Technology, 48 (3), pp. 202–216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.06.003>.
7. Gallagher, J. E., Oughton, E. J. (2023). "Assessing thermal imagery integration into object detection methods on air-based collection platforms," Scientific Reports, 2023, 13, 8491, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34791-8>.

8. Wang, P., Wu, J., Fang, A., Zhu, Z., and Wang, C. (2024). "Multi-spectral image fusion for moving object detection," *Infrared Physics & Technology*, 2024, vol. 141, 105489, doi: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105489>.
9. Gallagher, J. E., Oughton, E. J. and Kosecka, J. (2025). "Multi-temporal Adaptive Red-Green-Blue and Long-Wave Infrared Fusion for You Only Look Once-Based Landmine Detection from Unmanned Aerial Systems," *ArXiv*, arXiv:2512.20487 [cs.CV], 2025, 21 p., doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.20487>.
10. Shklyar, S., Andreiev, A., & Golubov, S. (2025). "Accuracy assessment of landmine detection by infrared aerial imaging," *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 2025, 12(4), pp. 16–20. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2025.12.4.294>.
11. Skorlupin, O., & Podorozhniak, A. (2024). "Optical methods for detecting explosive objects using autonomous unmanned systems," *Problems of informatization: Proceedings of 12-th International Scientific and Technical Conference*, 2024, p. 132. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/87663>.
12. Skorlupin, O., & Podorozhniak, A. (2025). "Mobile explosive detection system for civil defense needs," *Problems of Informatics and Modeling (PIM-2025): Proceedings of 25-th International Scientific and Technical Conference*, 2025, p. 89. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/87663>.
13. Podorozhniak, A., Liubchenko, N., Skorlupin, O., Korolenko, S., & Stas, A. (2025). "Mobile explosive object detection system for humanitarian demining needs," *2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, 06-10 October 2025, Kharkiv, Ukraine, 2025, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288620>.
14. Popov, M., Stankevich, S., Mosov, S., Dugin, S., Golubov, S., Andreiev A., Lysenko A., & Saprykin, I. (2024). "Concept of a geoinformation platform for landmines and other explosive objects detection and mapping with UAV," *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024, vol. 106, no. 2, pp. 107–118, doi: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.17>.
15. Levchenko, D., Podorozhniak, A., & Liubchenko N. (2025). "Tools and methods for explosive objects detection using artificial intelligence and computer vision," *Control, Navigation and Communication Systems*, 2025, No. 3 (81), pp. 117–121, doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.3.117>.
16. Kim, J.-H., & Kwon, G.-R. (2025). "Image-Level Anti-Personnel Landmine Detection Using Deep Learning in Long-Wave Infrared Images," *Appl. Sci.*, 2025, 15 (15), 8613, doi: <https://doi.org/10.3390/app15158613>.
17. Malizia, M., Hasselmann, K., Miuccio, A., Haelterman, R., Tsiogkas, N. and & Demeester, E. (2025). "PFM-1 Landmine Detection in Vegetation Using Thermal Imaging with Limited Training Data," *2025 25th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Incheon, Republic of Korea, 2025, pp. 1864-1869, doi: <https://doi.org/10.23919/IC-CAS66577.2025.11301116>.
18. Ameyaw, D. A., Deng, Q., & Söffker, D. (2019). "Probability of Detection (POD)-based Metric for Evaluation of Classifiers Used in Driving Behavior Prediction," *Annual Conference of the PHM Society*, 2019, 11 (1), pp. 1-7, doi: <https://doi.org/10.36001/phmconf.2019.v11i1.774>.

Received (Надійшла) 28.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Подорожняк Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Andrii Podorozhniak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: andrii.podorozhniak@kpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6688-8407>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57202229410>.

Скорлупін Олександр Володимирович – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;

Oleksandr Skorlupin – PhD student, Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;

e-mail: oleksandr.skorlupin@cit.kpi.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0001-4295-4115>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=60435005700>.

Landmine detection using robotic systems based on multispectral video imaging

Andrii Podorozhniak, Oleksandr Skorlupin

Abstract. Relevance. Landmine detection using robotic systems with multispectral video imagery is driven by the critical need for safe, efficient, and highly accurate demining methods on post-conflict territories, where traditional approaches fail to provide sufficient speed and reliability in detecting explosive devices. **Object of research:** the process of remote search and detection of anti-personnel and anti-tank mines performed by robotic complexes utilizing computer vision in visible and thermal ranges. **Purpose of the article.** Development of a methodology for multispectral spatial analysis based on the synergy of spatial, structural (textural), and thermal characteristics of objects. **Research results.** The article details the physical nature of visibility differences (contrast) formation between explosive devices and their surroundings, principal configurations of sensor equipment, algorithmic stages of video stream processing in the onboard computer system within operational time frames, and the degree of external conditions' impact on identification effectiveness. It is established that the combined use of RGB cameras and thermal imagers (RGB-IR fusion) significantly improves the proportion of correctly detected targets under adverse observation conditions. **Conclusions.** The presented data demonstrate substantial potential for applying unmanned ground and aerial vehicles for multi-spectral monitoring in humanitarian demining operations. Scope of application of the obtained results: mobile robotic systems for multispectral detection of explosive objects.

Keywords: landmine detection; robotic system; multispectral imaging; computer vision; computer system; RGB-IR fusion; humanitarian demining.