

В.Б. Струтинський, д.т.н., професор,¹**Ю.М. Данильченко**, д.т.н., професор,¹**А.М. Гуржій**, д.т.н., професор,²**С.В. Майданюк**, к.т.н.,¹**В.С. Павлун**, студентка,*Національна академія педагогічних наук України,²**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»¹*

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ МІСЦЕВОСТІ СПЕЦІАЛЬНИМИ НАЗЕМНИМИ РОБОТИЗОВАНИМИ КОМПЛЕКСАМИ

На сьогодні у світі є досить багато способів і різноманітних систем, призначених для вирішення проблем гуманітарного розмінування. Переважно це технічні прилади, і мобільні наземні системи з різним ступенем автономності [1], але їх оперативність при обстеженні великих площ і безпечність використання технологічно обмежена ефективністю методів виявлення мін та міноподібних об'єктів [2]. Найбільші очікування в Україні пов'язують з розроблення нової технології дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів [3] на базі штучного інтелекту, що повністю відповідає і світовим тенденціям [4]. При цьому в [3] зазначається, що ймовірність правильного дистанційного виявлення мін з використанням БпЛА є досить високою і відповідає світовим вимогам до подібних систем військового призначення, але для цілей гуманітарного розмінування ефективність технології має бути більшою. Підвищити ефективність можливо шляхом додаткового наземного дообстеження «проблемних» ділянок місцерозміщення вибухонебезпечних предметів, виявлених на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів, але це потребує додаткового апаратурного і технологічного вдосконалення мобільних наземних систем, зокрема і шляхом застосування тактильних, акустичних, та інших методів сканування місцевості.

Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на безпілотних літальних комплексах [5] вказує на можливість застосування подібних методів і засобів збирання і оброблення інформації і за допомогою наземних комплексів. Цьому відповідає і концепція розвитку робототехнічних комплексів для розмінування, яка передбачає розширення їх функціональних можливостей для можливого застосування у нових напрямках завдяки створенню нових конструктивних схем або використанню уніфікованих підсистем міжтипового призначення [2].

Технологія розмінування включає аналіз системою штучного інтелекту попередніх гіпотез про наявність на місцевості небезпечних об'єктів, сформованих за результатами автоматизованого аналізу системою штучного інтелекту матеріалів зйомки місцевості з безпілотних літальних апаратів [5].

Результати аналізу попередніх гіпотез є основою для побудови централізованої платформи управління на базі системи штучного інтелекту. Для об'єктивної оцінки стану місцевості і уточнення гіпотез проводиться загальний огляд місцевості із максимальної висоти в межах робочого простору маніпулятора. Власне пошук небезпечних об'єктів здійснюється при детальному огляді місцевості оптичними та іншими засобами, які входять в інструментарій маніпулятора наземного роботизованого комплексу. Оптичні засоби використовують відеокамери з різними полями огляду та можливістю роботи в різних оптичних діапазонах, зокрема, інфрачервоному та ультрафіолетовому. За результатами огляду системою штучного інтелекту робиться висновок про рівень доступності небезпечних об'єктів на місцевості та необхідні дії по її покращенню.

Запропоновані наземні роботизовані комплекси забезпечують ідентифікацію та покращення доступності небезпечних об'єктів на місцевості шляхом очищення та видалення сторонніх предметів. Очищення підозрілих предметів на місцевості здійснюється безконтактними методами (обдув повітрям) або спеціальними пристроями, які входять в інструментарій маніпулятора наземного роботизованого комплексу. За результатами очищення місцевості системою штучного інтелекту робиться висновок про пошук та ідентифікацію небезпечних об'єктів на місцевості шляхом її фізичного сканування. Централізована платформа управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту забезпечує застосування тактильних, ударних, термічних, акустичних та інших методів знаходження мін та інших небезпечних об'єктів. Використовуються енергозберігаючі динамічні системи пошуку мін спеціальними пристроями, які приводяться в дію дистанційними приводами. Розроблено відповідне оснащення для фізичного сканування місцевості, засоби вимірювання та попередньої обробки інформації.

Розроблена централізована платформа управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту здійснює цифровізацію інформації, одержаної в результаті фізичних методів сканування місцевості. Сканування місцевості проводиться в межах секторіальної області Q робочого простору маніпулятора. При цьому область розбивається на елементарні ділянки огляду розміром $\Delta\varphi \times \Delta\rho$. Центр ділянки $P(ij)$ є точкою входу в позицію виконавчого пристрою маніпулятора, яка звичайно реалізується із певною похибкою. Точка позиціонування виконавчого пристрою маніпулятора $P(ij)$ індексуються в межах області. При цьому індекс (i) індексує зміни радіусу, а індекс (j) зміни полярного кута. Дана схема індексації відповідає матриці розмірністю $n \times m$, де n число рядків, а m число стовпців. Номер рядка (i) відповідає зміні радіусу ρ з

дискретністю $\Delta\rho$, а номер стовпчика матриці (j) відповідає полярному куту φ , який змінюється з дискретністю $\Delta\varphi$. Рациональним є вибір однакових значень зміни кута φ в межах області Q , тобто $\varphi = \text{const}$. Зміни радіусу $\Delta\rho$ вибираються різними в межах робочого простору.

Область робочого простору Q орієнтується за напрямком переміщення шасі наземного роботизованого комплексу. Секторіальна область Q робочого простору обрана із умови сканування всіх ділянок поверхні при покроковому переміщенні шасі комплексу. Введена спеціальна сітка точок позиціонування виконавчого пристрою маніпулятора в плані є основою для формування спеціальної сіткової інформаційної технології аналізу цифрових фрагментів сканограм поверхні на базі штучного інтелекту. Спеціальна сітка точок сканування $P(ij)$ враховує особливості конструкції надлегкого маніпулятора, зокрема точність позиціонування важелів у просторі та закони зміни керованих координат маніпулятора, наявність поворотних пальців схвату та механізмів мікропереміщень, які застосовуються для фізичного сканування поверхні. Застосовуються раціональні зигзагоподібні схеми формування матриць по рядкам або стовпчикам (рис.1, а і б).

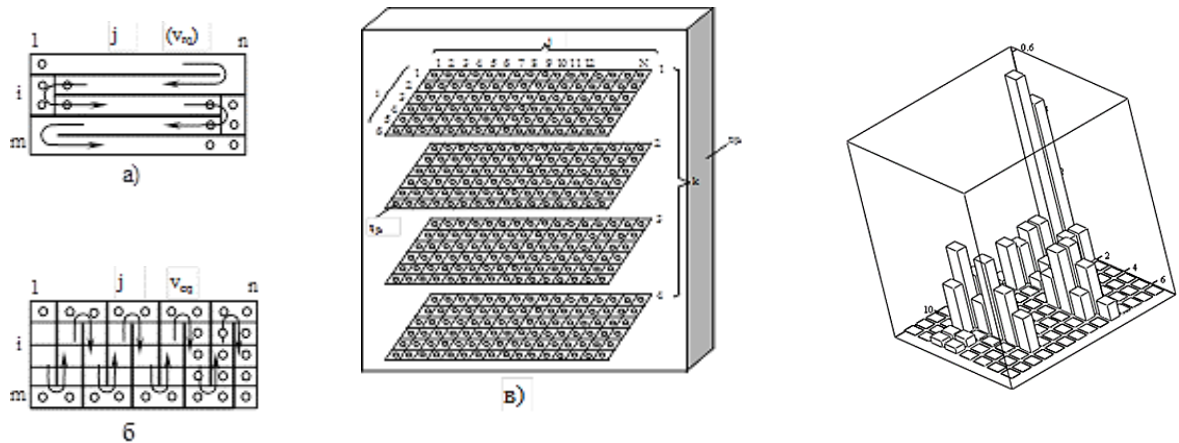


Рис. 1. Схеми формування матриць по рядкам (а) та стовпчикам (б), графічне зображення просторової тривимірної матриці (в) та візуалізація матриці I_{ij}^e , одержаної в результаті згортки просторової тривимірної матриці (г), яка визначає наявність небезпечних об'єктів на місцевості

В результаті тактильних, ударних, термічних, акустичних та інших методів фізичного сканування місцевості в межах секторіальної області Q визначається масив кількох десятків матриць параметрів, які відображають наявність небезпечних об'єктів на елементарних ділянках місцевості. За результатами попереднього аналізу кожної матриці на предмет її значущості, системою штучного інтелекту робиться висновок про узагальнення одержаної інформації.

Одержані матриці структуруються до виду просторової тривимірної матриці [6] (рис.1, в). В індексному записі просторова матриця подається у вигляді своїх компонент:

$$T = (t_{ijk}), i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,p. \quad (1)$$

Горизонтальні зрізи тривимірної матриці являють собою двовимірні матриці, які містять у цифровому вигляді інформацію про наявність мін та інших небезпечних об'єктів на місцевості:

$$T_1 = (t_{ijk1}), T_2 = (t_{ijk2}), \dots T_n = (t_{ijpn}). \quad (2)$$

За результатами аналізу зрізів тривимірної матриці системою штучного інтелекту виділяється базова просторова тривимірна матриця, яка містить суттєву інформацію про наявність небезпечних об'єктів в межах секторіальної області Q місцевості та проводиться згортка даної матриці. Визначаються компоненти узагальнюючої плоскої матриці I_{ij}^e , одержаної в результаті згортки просторової тривимірної матриці по індексу k (рис.1, г).

Системою штучного інтелекту проводиться аналіз узагальнюючої матриці із застосуванням моментів різних порядків. Обчислюється момент нульового порядку матриці I_{ij}^e .

$$m_0 = \mu \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij}^e. \quad (3)$$

Момент нульового порядку m_0 [9] з точністю до множника μ є основним діагностичним параметром узагальнюючої матриці і визначає сумарну кількість небезпечних об'єктів у секторіальній області Q робочого простору.

Моменти першого порядку розподілу інтенсивності узагальнюючої матриці визначаються відносно осей секторіальної області Q робочого простору і обчислюються згідно формул:

$$m_{x1} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij} \times \mu \times \Delta y \times \left(i - \frac{1}{2}\right). \quad m_{y1} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m I_{ij} \times \mu \times \Delta x \times \left(j - \frac{1}{2}\right). \quad (4)$$

Визначаються моменти більш високих порядків:

$$m_{x\nu} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i^\nu I_{ij} \mu,$$

$$m_{y\nu} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_j^\nu I_{ij} \mu, \quad (5)$$

де ν - порядок моменту.

Змішані моменти включають добутки компонент узагальнюючої матриці різних степенів:

$$m_{xy\nu1} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i^{\nu-1} x_j I_{ij} \mu,$$

$$m_{xy\nu2} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i^{\nu-2} x_j^2 I_{ij} \mu,$$

$$m_{xy(\nu-1)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_i x_j^{(\nu-1)} I_{ij} \mu. \quad (6)$$

На основі аналізу узагальнюючої матриці із застосуванням моментів різного порядку системою штучного інтелекту проводиться інтегральна оцінка матриці шляхом її обробки методами гіперспектрального аналізу на основі застосування двовимірних рядів Фур'є.

Для цього одержана в результаті згортки просторової тривимірної матриці узагальнююча матриця корегується для приведення до квазіперіодичного виду введенням форм-фактору і згладжується кубічними сплайнами. Одержана функціональна залежність $z_s(x, y)$ подається у вигляді розкладу в кратний (двовірний) ряд Фур'є виду:

$$z(x, y) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_{km} e^{j(k\omega_x x + m\omega_y y)} \quad (7)$$

де $\omega_x = \frac{2\pi}{T_x}$, $\omega_y = \frac{2\pi}{T_y}$, $j = \sqrt{-1}$, T_x, T_y - періоди, відповідні ортогональним напрямкам секторіальної області

Q відповідно.

Коефіцієнти ряду є комплексними числами, які визначено залежністю:

$$C_{km} = \frac{1}{T_x T_y} \int_{-\frac{T_x}{2}}^{\frac{T_x}{2}} \int_{-\frac{T_y}{2}}^{\frac{T_y}{2}} z_s(x, y) \cdot e^{j(k\omega_x x + m\omega_y y)} \quad (8)$$

В результаті обчислення інтегралів знаходяться комплексні коефіцієнти ряду Фур'є.

З використанням комплексних коефіцієнтів централізована платформа управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту здійснює гіперспектральний аналіз узагальнюючої матриці, в якій зосереджена інформація про наявність та розташування небезпечних об'єктів в межах секторіальної області Q місцевості. Гіперспектр узагальнюючої матриці порівнюється із набором еталонних спектрів, наявних в базі даних централізованої платформи управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту.

Системою штучного інтелекту проводиться аналіз просторової матриці на предмет відповідності її складових попереднім гіпотезам про наявність на місцевості небезпечних об'єктів. Гіпотези уточнюються з використанням методів теорії нечітких множин. На основі уточнених гіпотез проводиться фільтрація та впорядкування просторової матриці. Аналізуються її окремі блоки та зрізи, проводиться розгортання окремих блоків із виділенням характерних векторів та встановлення їх розташування та конфігурації. Вони служать для сегментації сцени та розуміння сюжету. Здійснюється прив'язка до місцевості (точки верифікації). Важливими задачами централізованої платформи управління наземними роботизованими комплексами на базі системи штучного інтелекту є розпізнавання зображень, виявлення та ідентифікація характерних небезпечних об'єктів. Розпізнавання образів здійснюється шляхом кластеризації окремих блоків та зрізів просторової матриці за допомогою штучних нейронних мереж. В результаті навчання мережі знаходяться центри кластерів, що відповідають окремим групам небезпечних об'єктів. Вони утворюють кластерну модель наявності на місцевості небезпечних об'єктів таких як міни і боєприпаси.

Для цього використано штучні нейронні мережі у вигляді карт, які самоорганізуються [6]. Дані нейронні мережі можна розглядати як удосконалену модифікацію шару конкуруючих нейронів (шару Кохонена) [7]. Карті, які самоорганізуються виявляють в процесі навчання центри кластерів вхідних масивів даних. В процесі навчання штучної нейронної мережі визначаються вагові коефіцієнти в окремих синапсичних блоках нейрона. У використаній для кластерного аналізу нейронній мережі нейрони знаходяться у вузлах гексагональної решітки. Для створення нейронної мережі використано 30 нейронів, які розташовані у вигляді гексагональної решітки

розмірністю $5 \times 6 = 30$. Решітка має 5 шарів нейронів по 6 нейронів у кожному. Для навчання нейронної мережі використана стандартна ітераційна процедура [6] (рис. 2, а). Проведено навчання нейронної мережі при числі ітерацій 1000. Після досягнення даної кількості ітерацій процес навчання мережі вважається завершеним. На друк виводиться інформація про групи «конкуруючих» нейронів (рис. 2, б).



Рис. 2. Графічний супровід процесу навчання штучної нейронної мережі (а) та графічна інтерпретація ступені активності окремих нейронів, яка має місце в кінці навчання мережі (б).

Кластеризація окремих блоків та зрізів просторової матриці дає можливість встановити наявність на місцевості небезпечних об'єктів, таких як міни і боеприпаси.

Запропоновані основні положення технології розмінування на базі штучного інтелекту будуть розвинені і уточнені в процесі подальших досліджень.

Література:

1. Marques, L., Almeida, A. T. de, Armada, M., Fernández, R., Franceschi, H. M., González, P. D., & Baudoin, Y. (2016). State of the Art Review on Mobile Robots and Manipulators for Humanitarian Demining. <http://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/2401>
2. Кириленко В.А. Глобальна проблема розмінування: стан та підходи до розв'язання / В.А. Кириленко, В.Р. Нероба //Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень НУОУ імені Івана Черняхівського. 2019, №2(66) - С. 115-119. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-2-66/115-119>
3. Попов М.О. Технологія дистанційного виявлення мін на основі аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів: стан та перспективи: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 6 квітня 2022 року. Вісник НАН України. 2022, №5 - С 56–62. <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.056>
4. Swett, V.A., Hahn, E.N., Llorens, A.J. (2021). Designing Robots for the Battlefield: State of the Art. In: von Braun, J., S. Archer, M., Reichberg, G.M., Sánchez Sorondo, M. (eds) Robotics, AI, and Humanity. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54173-6_11
5. Молочко С.М. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БпАК / С.М. Молочко, В.Г. Башинський, О.Г. Каламурза, В.А. Журахов //Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. № 2(8) – С. 80-90. <https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/102>
6. Киричок П.О. Спеціальні методи наукових досліджень /П.О. Киричок, С.В. Струтинський, В.Г. Олійник; НТУУ «КПІ». – Київ: АртЕк, 2016. – 594 с. ISBN 978-617-7264-28-5
7. Miljković, Z., Mitic, M., Lazarevic, M.P., & Babic, B.R. (2013). Neural network Reinforcement Learning for visual control of robot manipulators. Expert Syst. Appl., 40, 1721-1736. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.09.010>