УДК 681.518.52:623.71

А. О. Родюков, І. М. Пічугін, В. А. Юхно

ЗАСТОСУВАННЯ ШІ ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗОНДУВАННЯ ГРУНТУ ПРИ ВИБОРІ МАРШРУТУ UGV

Анотація: *Розроблена методологія обробки даних ультразвукового зондування із застосуванням алгоритмів штучного інтелекту для розпізнавання фізико-механічних властивостей ґрунту та глибини водяних перешкод у реальному часі. Запропоновано комплексну модель, що включає первинну фільтрацію сигналів та подальший аналіз спектрограм за допомогою нейромережевих архітектур. Для оцінки прохідності введено коефіцієнт, який відображає акустичний імпеданс поверхні та занурення шасі. Практична цінність розробленого підходу полягає в підвищені надійності прокладання траєкторії руху наземної безпілотної системи в реальних умовах.*

Ключові слова: *UGV, наземні безпілотні системи, ультразвукове зондування, штучний інтелект, прохідність ґрунту.*

Annotation: *A methodology for processing ultrasonic sensing data using artificial intelligence algorithms for real-time recognition of soil physical and mechanical properties and the depth of water obstacles has been developed. A comprehensive model is proposed, incorporating primary signal filtering and subsequent spectrogram analysis using neural network architectures. To assess mobility, a coefficient reflecting surface acoustic impedance and chassis immersion is introduced. The practical value of the developed approach lies in improving the trajectory planning reliability of an unmanned ground vehicle under real-world conditions.*

Keywords: *UGV, unmanned ground vehicles, ultrasonic sensing, artificial intelligence, soil traversabiliry.*

Наземні безпілотні системи (UGV – Unmanned Ground Vehicles) активно застосовуються в логістиці, евакуації, інженерно-саперних роботах, розвідці та як бойові (вогневі) модулі [1, 2]. Ефективність застосування UGV залежить від їхньої автономності та здатності долати складний рельєф. На відміну від повітряних дронів, робота UGV проходить у безпосередньому контакті з поверхнею землі. Великою загрозою для наземного робота є не лише фізичні перешкоди (стіни, дерева, каміння), а й механічні властивості ґрунту – багно, пісок, сніг та приховані під травою чи водою вибоїни та калюжі [3].

Більшість сучасних систем автономної навігації покладаються на камери та LiDAR-и. Однак оптичні системи та оптичне зондування дає змогу оцінити лише геометричний профіль поверхні. Вони нездатні визначити несучу здатність ґрунту або виміряти реальну глибину калюжі з каламутною водою. Оптичні сенсори також втрачають ефективність за умов задимленості, пилу, засліплення або повної темряви.

Розв’язанням цієї проблеми є впровадження ультразвукового зондування у поєднані з алгоритмами штучного інтелекту [4, 5]. Використання ультразвуку дає можливість проходити крізь товщу води, аналізувати щільність підповерхневого шару та визначати акустичний імпеданс ґрунту [6]. Мета роботи полягає в досліджені методів обробки ультразвукового сигналу за допомогою ШІ для динамічного формування безпечного маршруту наземного безпілотного дрона.

Ультразвукова локація ґрунту та поверхні базується на випромінюванні акустичних імпульсів у діапазоні від 20 кГц до 200 кГц та аналізі відбитого відгуку. При взаємодії ультразвукової хвилі з поверхнею ми отримуємо кілька типів інформації:

– час затримки сигналу (дозволяє обчислити відстань до поверхні або твердого дна водяної перешкоди);

– амплітудне загасання сигналу та акустичний імпеданс (різні типи ґрунту чи покриття мають різний коефіцієнт відбиття, ступінь вологості впливає на поглинання сигналу);

– спектральний склад відбитого сигналу (у наслідок дисперсії та неоднорідності ґрунту).

Головною складністю аналізу ультразвукових даних полягає у наявності високого рівня шумів, мультишляховому віддзеркалені та чутливості до кута падіння променя [7]. Тому традиційні порогові алгоритми виявляються неефективними і виникає потреба в глибокому навчанні та аналізі часових рядів, тобто застосуванні ШІ.

Процес обробки даних у ШІ-модулі на борту UGV складається з трьох послідовних етапів:

– обробка відображеного сигналу з виділенням первинних ознак (перетворення аналогового сигналу у цифровий та створення спектрограми);

– класифікація та оцінка стану ґрунту за допомогою нейромереж Convolutional Neural Networks (1D/2D CNN) та Recurrent Neural Networks (LSTM/GRU);

– модель прогнозування прохідності (обчислення значення коефіцієнта прохідності та оцінка коефіцієнта проковзування).

Для усунення низькочастотних вібрацій шасі та високочастотних електричних завад застосовується фільтр Баттерворта 4-го порядку. З метою аналізу амплітудного профілю відгуку проводиться формування аналітичного сигналу через перетворення Гільберта.

Спектрально-часовий аналіз відображеного сигналу проводиться з застосуванням віконного швидкого перетворення Фур'є (STFT):

$$X[m,\omega]=\sum_{n=-\infty}^{\infty} y[n]\cdot w[n-mR]\cdot e^{-j\omega m}$$

де $w[n]$ – віконна функція Хеммінга;

m – індекс часового зсуву вікна;

R – крок зсуву;

ω – дискретна частота.

Спектрограма розраховується як квадрат модуля STFT:

$$S[m,k]=|X[m,\omega_k]^2$$

На основі отриманих даних з ШІ-модуля проводиться прокладання та корекція маршруту руху UGV:

– побудова та оновлення Карти вартості (Простір перед UGV розбивається на сітку комірок. Кожній комірці присвоюється вартість проходу ($Cost$). При твердому ґрунті на шляху руху UGV $Cost = 0$ – тобто ідеальний маршрут, якщо на шляху мілка калюжа (трава)

$Cost = 50$ – прохід можливий зі зниженням швидкості, а якщо глибока калюжа (глибина більша кліренсу) або рідка глина $Cost = 255$ – непрохідна перешкода.);

– динамічна перебудова траєкторії руху (Алгоритми локального планування (TEB Local Planner або DWA – Dynamic Window Approach) у реальному часі прокладають сплайн-траєкторії в обхід зон з високою вартістю. Якщо UGV наближається до ділянки з багнюкою, ШІ заздалегідь дає команду повернути або знизити швидкість та переключити крутний момент трансмісії (двигунів);

– комплексна обробка даних (Ультразвуковий модуль працює сумісно з Visual Odometry та IMU. Наприклад, якщо оптична камера фіксує попереду затемнення (що може бути, як тінню, так і глибокою ямою з водою), ультразвуковий модуль виступає в ролі арбітра, підтверджуючи або спростовуючи наявність фізичної небезпеки.).

Застосування штучного інтелекту для обробки даних ультразвукового зондування вирішує фундаментальну проблему наземної робототехніки – оцінку якісного та механічного стану покриття до моменту застрягання UGV. Основні переваги підходу:

– автономність в умовах РЕБ та відсутності GPS;

– незалежність від кліматичних (погодних) умов;

– низька обчислювальна складність (можливість використання NVIDIA Jetson або навіть потужних NPU мікроконтролерів).

Подальші дослідження можуть бути направлені на створення глобулярних масивів ультразвукових трансиверів із фазовою решіткою для формування 3D-акустичної карти покриття високої роздільної здатності безпосередньо перед UGV.

Список використаних джерел:

1. Гур'єв Д. О., Рогуля О. В., Опенько П. В. Розроблення пропозицій щодо складу та способів застосування наземних роботизованих зенітних ракетних комплексів і систем // Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України. – 2026. №1(87). С. 74 – 83.
2. Струтинський В. Б., Гуржій А. М. Наземні роботизовано комплекси : монографія. Житомир : ПП "Рута", 2023. 524 с.
3. Засади розвитку роботизованих систем в Збройних Силах України : кол. Монограф. / за заг. ред. проф. О. М. Семененка. Київ : 7 БЦ, 2023. 348 с.
4. Кравчук А. Р., Ткачук А. Г., Добржанський О. О., Богоявленська Ю. В., Ткачук Д. Ю. Аналіз методів автономної навігації BPLA в умовах відсутності GPS-сигналу // Технічна інженерія. – 2025. №1(95). С. 235 – 242.
5. Мальований В. В., Журід В. І., Капінс М. С., Яковлєв Р. П. Сучасні методи навігації безпілотних літальних апаратів // Повітряна міць країни. – 2025. №2(9). С. 123 – 132.
6. Мікуш П., Березніцька А., Когутиар М., Еккерт М., Крбата М., Нрицук І. Використання ультразвукових датчиків на безпілотних літальних апаратах та аналіз їхньої точності // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2026. №86. с. 104 – 110.
7. Лютак І. З., Лютак З. П. Компонентний підхід до передавання сигналу та оброблення результатів при ультразвуковому контролі // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2024. №1(56). С. 92 – 100.

Родюков Анатолій Олексійович *– доцент кафедри теорії та конструкції автомобільної та спеціальної техніки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: avtorao@ukr.net, ORCID https://orcid.org/0009-0000-2090-6318.*

Пічугін Ігор Михайлович *– кандидат технічних наук, начальник кафедри теорії та конструкції автомобільної та спеціальної техніки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: Pritex15246@meta.ua, ORCID https://orcid.org/0009-0003-2655-5485.*

Юхно Віталій Анатолійович *– старший викладач кафедри теорії та конструкції автомобільної та спеціальної техніки, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, e-mail: 1970yva@ukr.net, ORCID https://orcid.org/0009-0000-3859-229X.*

Anatolii Rodiukov *– Associate Professor of the Department of Theory and Design of Automotive and Special Equipment, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: avtorao@ukr.net, ORCID https://orcid.org/0009-0000-2090-6318.*

Pichuhin Ihor *– PhD in Engineering, Head of the Department of Theory and Design of Automotive and Special Equipment, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: Pritex15246@meta.ua, ORCID https://orcid.org/0009-0003-2655-5485.*

Vitaly Yukhno *– senior teacher of the Department of Theory and Design of Automotive and Special Equipment, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, e-mail: 1970yva@ukr.net, ORCID https://orcid.org/0009-0000-3859-229X.*