

ТЕХНОЛОГІЯ І МЕТОДИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕТАЛЕВИХ ПРЕДМЕТІВ, ЩО ЗАЛЯГАЮТЬ У ВЕРХНІХ ШАРАХ ҐРУНТУ

Вадим Коррель, Олег Захожай

TECHNOLOGY AND METHODS OF COLLECTING INFORMATION FOR IDENTIFYING METAL OBJECTS IN TOPSOIL

Vadym Korrel, Oleh Zakhozhai

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, вул. Іоанна Павла
II, 17, Київ, 01042, Україна

Abstract. Detection of metal objects lying at a shallow depth is a relevant task in archaeology, construction, ecology, mineral exploration and the field of mine safety. Research objective: To propose a method and technology for identifying a metal object with given parameters based on a comparison of modern methods and technologies for detecting metal objects. The paper analyzes existing detection methods such as electromagnetic induction metal detectors (EMI), ground penetrating radar (GPR), magnetometers, and non-linear junction detectors (NLJD). The choice of a pulse induction (PI) metal detector based on a Raspberry Pi single-board computer is justified as the optimal platform in terms of cost, performance, and versatility. The developed hardware part of the complex and an information system with a client-server architecture for data collection and primary processing are presented. A hypothetical stack of signal processing methods (band-pass filter, RPCA-GoDec, FFT, RBF-SVM) is proposed for identifying ferrous objects of a certain size.

Вступ. Виявлення металевих предметів, що залягають в ґрунті на невеликій глибині (орієнтовно 0–50 см), є надзвичайно актуальним завданням у сучасному світі, особливо для України, що зумовлено низкою факторів у різних галузях, приклади яких наведено нижче.

1) Гуманітарне розмінування та безпека населення. Враховуючи, що значна частина території України потенційно забруднена вибухонебезпечними залишками війни, ефективні методи швидкого виявлення металевих об'єктів неглибокого залягання є критично важливими для мінімізації ризиків для цивільного населення та відновлення сільськогосподарських угідь.

2) Захист стратегічної інфраструктури. Металеві трубопроводи, кабелі та інші інженерні комунікації часто прокладаються на малих глибинах. Їх точне картування дозволяє зменшити аварійність під час будівельних чи ремонтних робіт та прискорює модернізацію енергетичних мереж.

3) Археологія та культурна спадщина. Низькоінвазивні технології дають змогу виявляти металеві артефакти без руйнування ґрунтового шару, що є особливо цінним в умовах обмеженого часу розкопок і необхідності збереження контексту знахідок.

4) Роботизація та дистанційний моніторинг. Зростання застосування наземних і повітряних роботизованих платформ висуває нові вимоги до сенсорів в аспекті маси, енергоспоживання, швидкодії та їх вартості, що стимулює розвиток легких і енергоефективних детекторів.

5) Економічна доцільність і ресурсна ефективність. Своєчасне виявлення металевих об'єктів дозволяє оптимізувати витрати на земляні роботи, скоротити простой техніки та уникнути дорогих аварій у промисловості та будівництві.

Аналіз існуючих методів збору та визначення інформації про металеві предмети. Існуючі методи збору інформації та ідентифікації металевих предметів можна класифікувати наступним чином.

1. Електромагнітні індукційні металошукачі (ЕМІ)

- Принцип дії: Генерація змінного електромагнітного поля та реєстрація вторинних полів, що створюються вихровими струмами в металевих об'єктах.
- Методи:
 - VLF (Very Low Frequency - Дуже Низька Частота): Найбільш поширені, забезпечують хорошу дискримінацію металів, чутливі до дрібних об'єктів. Глибина виявлення зазвичай до 1-1.5 метрів для середніх та великих об'єктів.
 - PI (Pulse Induction - Імпульсна Індукція): Менш схильні до впливу мінералізації ґрунту, забезпечують більшу глибину виявлення, особливо для великих об'єктів. Однак гірше розрізняють типи металів.
 - Багаточастотні методи: Забезпечують покращену дискримінацію та стабільну роботу на різних типах ґрунтів.
- Переваги: Відносна простота використання, портативність, доступність, хороша чутливість до різних металів.
- Недоліки: Обмежена глибина виявлення, сильна залежність від мінералізації ґрунту (особливо для VLF), складність точного визначення форми та розміру об'єкта.
- Застосування: Пошук монет, реліквій, кабелів, невеликих металевих фрагментів.

2. Георадари (GPR - Ground Penetrating Radar)

- Принцип дії: Випромінювання високочастотних електромагнітних імпульсів у землю та реєстрація відбитих сигналів від меж розділу середовищ з різними діелектричними властивостями, включаючи металеві об'єкти.
- Методи: Розрізняються за частотою використовуваних антен (від десятків МГц до декількох ГГц). Нижчі частоти забезпечують більшу глибину, але меншу роздільну здатність; високі частоти – навпаки.
- Переваги: Здатність виявляти як металеві, так і неметалеві об'єкти та структури (порожнини, порушення ґрунту), можливість оцінки глибини залягання та форми об'єкта, створення профілів та карт підповерхневого простору.
- Недоліки: Висока вартість обладнання, складність інтерпретації даних (потрібен досвідчений оператор), сильне загасання сигналу у вологих та глинистих ґрунтах, перешкоди від наземних об'єктів. Для металевих об'єктів не завжди дає однозначну ідентифікацію типу металу.
- Застосування: Археологічні дослідження, інженерна геологія (пошук комунікацій, фундаментів), обстеження будівельних конструкцій, пошук великих металевих об'єктів.

3. Магнітометри

- Принцип дії: Вимірювання варіацій магнітного поля Землі, викликаних присутністю феромагнітних матеріалів (залізо, сталь та ін.).
- Методи: Протонні, Оверхаузера, цезієві та ін. Розрізняються за чутливістю, точністю та швидкістю вимірювань.
- Переваги: Велика глибина виявлення для великих феромагнітних об'єктів (до декількох метрів), пасивний метод (не випромінює сигналів), відносно не схильні до впливу більшості типів ґрунтів.
- Недоліки: Виявляють тільки феромагнітні матеріали (неефективні для більшості кольорових металів), низька роздільна здатність (складно локалізувати дрібні об'єкти або розділити близько розташовані), чутливість до промислових перешкод та наявності інших магнітних аномалій.
- Застосування: Пошук великих залізних об'єктів (трубопроводи, боеприпаси, що не розірвалися, археологічні об'єкти із заліза), геологічне картування.

4. Нелінійні локатори (NLJD - Non-Linear Junction Detectors)

- Принцип дії: Опромінення досліджуваного середовища радіосигналом та реєстрація сигналів у відповідь на гармоніках основної частоти, які виникають при перевипромінюванні сигналу електронними компонентами. Хоча основною метою є напівпровідникові елементи, можуть реагувати і на контакти метал-оксид-метал.
- Переваги: Унікальна здатність виявляти електронні пристрої, в тому числі з неметалічним корпусом або малою металевою масою.
- Недоліки: Обмежена глибина виявлення, висока вартість, можливість помилкових спрацьовувань від природних нелінійних переходів (наприклад, корозія). Менш універсальні для пошуку "простих" металевих предметів без електроніки.
- Застосування: Пошук прихованих електронних пристроїв, мін з електронними детонаторами.

Обґрунтування вибору технології та платформи для дослідження. Метою даного дослідження є обрання технології та методу, які можна реалізувати за умов мінімізації фінансових витрат, забезпечуючи при цьому задовільні показники ідентифікації металевих об'єктів заданих параметрів (розмір, скупчення). З огляду на характеристики розглянутих вище методів, для подальшої розробки було обрано електромагнітний індукційний металошукач на основі імпульсної індукції (PI). Цей вибір зумовлений меншою чутливістю PI-металошукачів до мінералізації ґрунту та більшою глибиною виявлення порівняно з VLF-приладами, що є важливим для ідентифікації об'єктів типу протитанкових мін. Одним із ключових викликів є вибір для нього апаратної та програмної платформи, яка б забезпечувала оптимальний баланс між вартістю, продуктивністю, енергоефективністю та універсальністю. Таким чином, було обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi. Його перевагами є доступна вартість, велика спільнота розробників, простота інтеграції з різноманітними сенсорами та достатній рівень продуктивності для обробки даних від PI-металошукача.

Розробка інформаційної технології. Для створення запропонованої інформаційної технології було використано ОПК Raspberry Pi у поєднанні з імпульсним металошукачем Tracker 2. Розроблена апаратна частина комплексу дозволяє отримувати цифрові дані від металошукача, що відповідають вторинним полям, які створюються вихровими струмами в металевих об'єктах. Додатково, в реалізації моделі передбачено GPS-модуль, що дозволяє фіксувати координати виявлених об'єктів на мапі. Таку апаратну частину інформаційної системи можна легко адаптувати для встановлення на борту наземного дрона для виконання пошукових завдань.

Програмна реалізація передбачає клієнт-серверну архітектуру. Серверна частина функціонує на Raspberry Pi під керуванням Raspberry Pi OS. Обробка даних та керування реалізовано на мові Python, зберігання даних здійснюється в СКБД SQLite. Передача даних між сервером (Raspberry Pi) та клієнтом (Android-застосунок на пристрої оператора) відбувається через локальний веб-сервер Nginx за допомогою REST API. Серверний застосунок реалізовано як сервіс на базі мікрофреймворку Flask.

Пропонований метод обробки даних та ідентифікації об'єктів. Наступним етапом є обробка отриманих цифрових даних з метою ідентифікації залізних предметів, зокрема, об'єктів типу протитанкової міни або їх скупчень. Як гіпотезу запропоновано наступний послідовний підхід до обробки та аналізу сигналів.

- 1) Попередня обробка сигналу. Застосування смугового фільтра (Band-pass filter) для видалення небажаних частотних компонент та методу RPCA-GoDec (Robust Principal Component Analysis via Go Decomposition) для ефективного усунення низькочастотного дрейфу сигналу та коротких високочастотних сплесків, характерних для PI-детекторів при роботі на реальному ґрунті.
- 2) Виділення ознак. Застосування Швидкого Перетворення Фур'є (FFT) або вейвлет-перетворення для виявлення характерних частотних компонент, зокрема, пов'язаних з наявністю фериту (в діапазоні кількох кГц).

- 3) Класифікація. Використання алгоритму машинного навчання – методу опорних векторів з радіальною базисною функцією (RBF-SVM). Цей алгоритм може ефективно розрізняти кластери «залізо» / «не залізо» у просторі 3–6 дескрипторів (амплітуда сигналу, частота відгуку, тривалість імпульсу, форма сигналу), не вимагаючи при цьому великого набору даних для навчання. А також має здатність до нелінійної класифікації - корисно, коли межа між класами (залізо/не залізо) не лінійна.

Висновки. У ході дослідження було розроблено апаратну частину комплексу на базі Raspberry Pi та імпульсного металошукача. Були отримані експериментальні дані, які слугуватимуть основою для подальшої роботи з ідентифікації залізних предметів із заданими розмірами. Це планується досягти шляхом застосування запропонованих, як гіпотеза, методів обробки сигналів та машинного навчання, а також їх можливої модифікації.

Представлений підхід забезпечує не лише ефективність та функціональність системи, зокрема при використанні на роботизованих платформах (дронах), але й дає можливість легко масштабувати систему, додаючи нові модулі або сенсори відповідно до потреб, а також збільшувати кількість задіяних пристроїв.

Напрямки подальших досліджень. Перспективним напрямком подальшого розвитку представленої технології є інтеграція даних з магнітометричного сенсора. Аналіз та порівняння даних від імпульсного металошукача та магнітометра може дозволити отримати більш точні та надійні результати ідентифікації металевих об'єктів.

Бібліографія

1. Федоренко Г., Фесенко Г., Чарченко В. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів // *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2022. № 4(22). С. 24–35.
2. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2024. Том 35 (74), № 5, Частина 2. С. 153-158
3. Захожай О.І., Коррель В.В. Інформаційна технологія формування карти просторового розташування малорозмірних об'єктів для геоінформаційних систем // *Наукові вісті Давіського університету*. 2024. № 27. С. 2–4.
4. Lei Y., Jiang B., Su G. Comparative Study of GPR Acquisition Methods for Shallow-Buried Object Detection // *Remote Sensing*. 2025. Vol. 16, Iss. 21. Art. 3931. DOI: 10.3390/rs16213931.
5. Saleh M., Naim S. Development and Implementation of a Low-Cost PI Metal Detector Device // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2024. Vol. 13, № 2. P. 731–740.
6. Edemsky D. et al. A Comparative Study of Ground-Based and Drone-Based GPR // *BIO Web of Conferences*. 2025. Vol. 56. Art. 05004.
7. Al-Sabbagh S., Popov A. GPR Signal Processing for Landmine Detection: A Comparative Study // *International Journal of Computer & Digital Systems*. 2024. Vol. 13, № 4. P. 215–224.
8. Yilmaz E. Detection and Classification of Multiple Shallow-Buried Targets by GPR. MSc Thesis. Middle East Technical University, 2023.
9. Thomas R. et al. Machine learning classification of metallic objects using pulse-induction electromagnetic data // *Measurement Science & Technology*. 2024.
10. Jeong S. et al. Investigation of electromagnetic pulse scattering for metallic object classification // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2024.