

УДК 621.38

ВІНТОНЯК В. М.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, Івано-Франківськ, Україна

ІННОВАЦІЇ В ЕЛЕКТРОНІЦІ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У ПОВЕРХНЕВИХ ШАРАХ ҐРУНТУ: ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ПОДАЛЬШОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ

Мета. Дана публікація розкриває комплексний аналіз сучасних електронних технологій для виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту, дозволяє оцінити їх ефективність та точність, а також визначити перспективні напрямки для подальших інновацій та досліджень у цій галузі.

Методика. Для досягнення цілей дослідження було застосовано теоретичний аналіз наукової літератури, а також методи аналізу та узагальнення наявних даних. Основними інструментами дослідження стали порівняльний аналіз та класифікація використовуваних методів виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту. Вирішення наукових завдань проводилося за допомогою системного підходу у виборі матеріалів, використання індуктивного та логічного аналізу, методів спостереження для аналізу інформації, отриманої з літературних джерел.

Результати. У дослідженні було проаналізовано основні технології виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту: георадари (GPR), металодетектори, лазерну доплерівську віброметрію, магнітометрію та оптичні методи. Було виявлено, що комбінація різних технологій може значно підвищити точність та ефективність виявлення об'єктів. Ця робота також підкреслила потенціал застосування машинного навчання для покращення класифікації об'єктів та зменшення кількості помилкових спрацювань. Надалі було встановлено, що зменшення маси та енергоспоживання детектувальних систем може сприяти їхньому застосуванню на безпілотних апаратах, що відкриває нові перспективи для використання цих технологій для дистанційного моніторингу та дослідження важкодоступних територій.

Наукова новизна. У даній роботі вперше систематизовано та проведено детальний аналіз наявних технологій для виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту, зокрема GPR, металодетекторів, лазерної віброметрії, магнітометрії та оптичних методів за такими критеріями, як глибина виявлення, вартість обладнання та можливість інтеграції з іншими системами. Проведений аналіз виявив прогалини в сучасних дослідженнях, що дозволяє визначити напрямки для подальшого розвитку кожного з методів, які включають вдосконалення точності, зменшення енергоспоживання та маси приладів для ефективного використання на БПЛА і наземних роботизованих системах.

Практична значимість. Отримано результати порівняння таких електронних технологій, як GPR, металодетектори, лазерна віброметрія, мультиспектральний імаджинг. Визначено сучасні тенденції розвитку даних технологій та можливості для подальших досліджень.

Ключові слова. металодетектор; магнітометрія; GPR; ґрунтопроникний радар; ґрунт; оптичні методи; лазерна віброметрія.

Вступ. У сучасному світі актуальність проблеми ідентифікації та виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту стає все більш важливою у різних сферах життя, особливо в контексті забезпечення безпеки територій від небезпечних об'єктів. Це питання є одним із ключових для міжнародного співтовариства у контексті збройних конфліктів та постконфліктного відновлення. Наприклад, в Україні внаслідок бойових дій заміновано близько чверті території, що потребує значних зусиль для проведення безпечного розмінування [1]. Цей процес не тільки складний, але й пов'язаний з ризиками травм і смертей серед саперів. За експертними оцінками, гуманітарне розмінування, з використанням наявних ресурсів у 500 груп, може тривати близько 757 років [2]. Подальший розвиток електронних методів виявлення може суттєво спростити і здешевити роботи у сферах будівництва та комунального господарства, де точне локалізування підземних комунікацій є критично

важливим. В урбанізованих умовах неточні земляні роботи можуть спричинити значні фінансові збитки через пошкодження інфраструктури та затримки в усуненні наслідків аварій [3].

Таким чином, попри значні наукові досягнення у даній галузі, подальші дослідження в області інновацій електроніки для виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту мають критичне значення для вирішення згаданих вище проблем. Впровадження новітніх технологій здатне не лише підвищити ефективність процесів розмінування та зменшити асоційовані з ними ризики, але й суттєво оптимізувати роботу у сферах, де потрібне точне виявлення підземних об'єктів.

Постановка завдання. Аналіз наукових джерел в галузі виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту свідчить, що такі технології як металодетектори, георадари, лазерна віброметрія та оптичні системи, постійно розвиваються, вносячи інновації, які підвищують ефективність і точність виявлення. Всупереч значним досягненням, існують "білі плями" у дослідженнях, такі як інтеграція різних методів для забезпечення вищої точності та надійності систем, а також оптимізація енергоспоживання та ваги приладів для їх ефективного застосування в безпілотних наземних та літальних апаратах. Стаття має на меті дослідити ці прогалини, проаналізувати сучасний стан методів та визначити потенційні напрями для подальших удосконалень, що могли б забезпечити краще виявлення небезпечних та цінних об'єктів під землею.

Результати дослідження. Для виявлення та ідентифікації об'єктів у верхніх шарах ґрунту застосовуються різні методи. Вони базуються на реєстрації реакції виявленого об'єкта на вплив різних штучних фізичних полів, наприклад, електромагнітних, акустичних, сейсмічних, теплових, іонізованих тощо. Під впливом цих полів відгук прихованого об'єкта змінюється залежно як від типу збуджувального поля, так і від індивідуальних параметрів виявленого об'єкта.

На сьогодні металошукачі є найбільш поширеними і доступними засобами виявлення об'єктів у ґрунті. Найбільш поширені технології для побудови схемотехніки металошукачів: биття частот – BFO (Beat Frequency Oscillation) [4]; метод індукційного балансу, що використовує дуже низькі частоти – VLF/TR (Very Low Frequency/Transmitter-Receiver) [4]; імпульсний метод – PI (Pulse Induction) [4].

На рис. 1 зображена схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом VLF/TR.

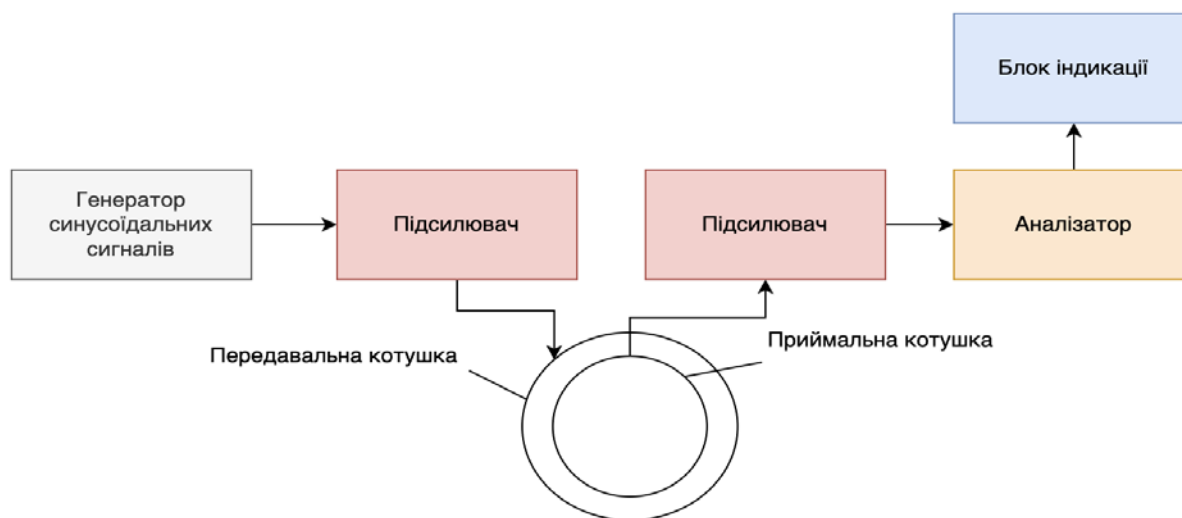


Рис. 1. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом VLF/TR

Дані металодетектори складаються з наступних основних елементів: генератор синусоїдальних сигналів – цей блок генерує синусоїдальні хвилі низької частоти, які є основою для випромінювання електромагнітного поля металодетектором; передавальна котушка – отримує синусоїдальні сигнали від генератора і перетворює їх в електромагнітне поле, яке випромінюється в землю; підсилювачі – забезпечують необхідне підсилення сигналів перед їх передачею на котушки та після приймання з котушок, відповідно підвищуючи ефективність детекції; приймальна котушка – вловлює електромагнітні хвилі, модифіковані наявністю металевих предметів у ґрунті, і перетворює їх назад в електричні сигнали; аналізатор – обробляє прийняті сигнали, аналізуючи їхні амплітуду та фазу для ідентифікації наявності та характеристик металевих об'єктів; блок індикації – відображає результати аналізу, надаючи оператору інформацію про розташування та можливий тип виявлених металевих предметів.

Дана схема є представленням принципу роботи VLF металодетектора, що використовується для виявлення металів на різних глибинах із можливістю дискримінації між різними типами металів.

Схема металодетектора на основі імпульсної індукції (PI), яка включає генератор імпульсів, підсилювач, комутатор, а також універсальну передавально-приймальну котушку, демонструє високу ефективність виявлення металевих об'єктів на значних глибинах (рис. 2). Даний метод особливо корисний в умовах, де необхідно глибоке проникнення в ґрунт без чутливості до мінералізації, що робить її ідеальною для таких застосувань, як розмінування та археологічні дослідження [5].

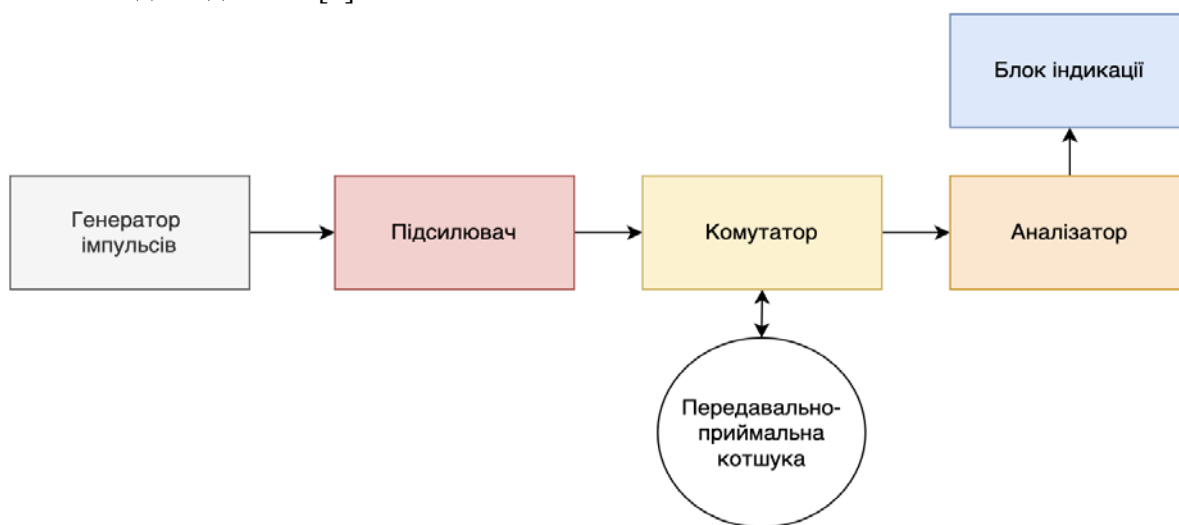


Рис. 2. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом PI

Генератор імпульсів в даній схемі відповідає за створення коротких високо потужних імпульсів електричного струму, які є необхідними для генерації магнітного поля передавальною котушкою; підсилювач – забезпечує необхідне підсилення електричних імпульсів від генератора перед тим, як вони будуть відправлені до котушки. Це дозволяє забезпечити достатню енергію для глибокого проникнення магнітного поля в ґрунт; передавально-приймальна котушка – використовується для генерації магнітного поля та приймання сигналів, створених відгуками від металевих предметів, індукованих у відповідь на це поле; комутатор – перемикає систему між режимами передачі та приймання, забезпечуючи, щоб передавальна котушка та система приймання сигналів не функціонували одночасно, що мінімізує ризик пошкодження приймача від високо потужних імпульсів; аналізатор – обробляє сигнали, отримані від котушки, аналізуючи характеристики відбитих

сигналів для визначення наявності та властивостей металевих об'єктів; блок індикації – відображає результати аналізу, надаючи користувачеві інформацію про виявлені металеві об'єкти, їх розташування, розміри, і можливо, тип.

На рис. 3 зображена схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом BFO.

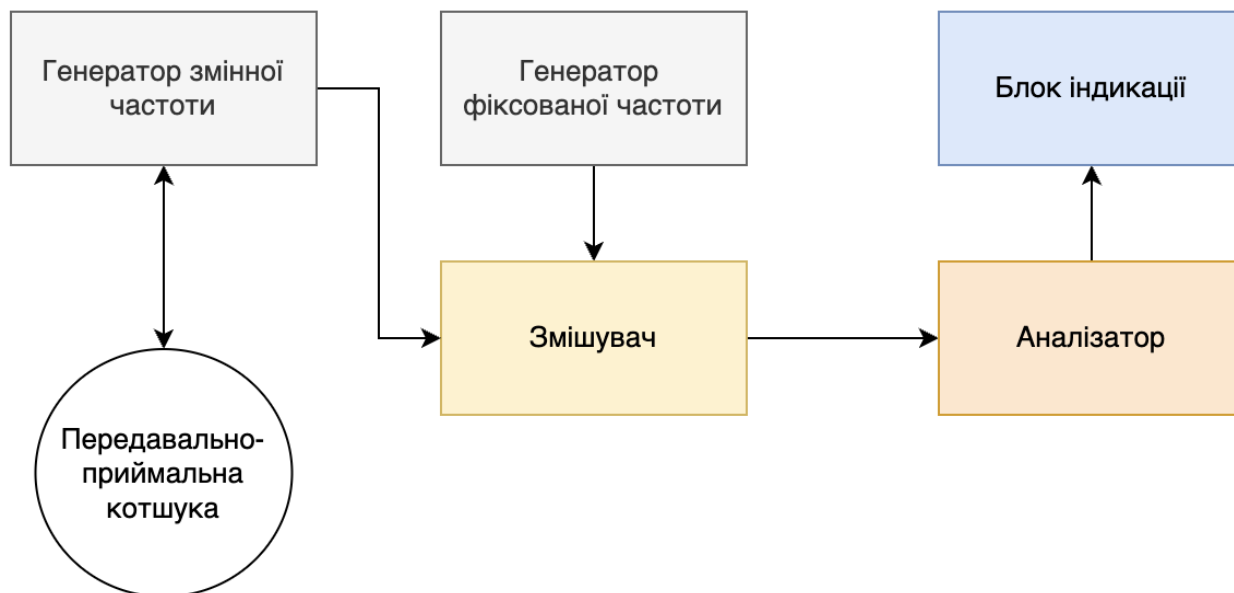


Рис. 3. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом BFO

На схемі представлено основні компоненти системи BFO металодетектора, які включають: генератор змінної частоти – створює сигнал змінної частоти, який подається на передавально-приймальну котушку для генерації електромагнітного поля; генератор фіксованої частоти – генерує сигнал фіксованої частоти, який використовується для створення опорного сигналу, необхідного для порівняння з прийнятим сигналом; передавально-приймальна котушка – використовується для передачі електромагнітних хвиль у навколишнє середовище та приймання хвиль, які відбиваються від металевих предметів; змішувач – поєднує сигнали з генераторів змінної та фіксованої частоти, виробляючи сигнал, частота якого дорівнює різниці частот вхідних сигналів, що дозволяє виявити зміни, спричинені металевими об'єктами; аналізатор – обробляє відмінності в частотах для визначення наявності та характеристик металевих об'єктів; блок індикації – відображає інформацію про виявлені об'єкти, зокрема їх тип та приблизне розташування.

Ця схема ілюструє фундаментальні принципи BFO металодетектора, який використовує биття частот між двома генераторами для виявлення металів. Цей метод забезпечує простоту та ефективність у виявленні металевих об'єктів, роблячи його популярним вибором для аматорських металошукачів.

В табл. 1 наведені результати порівняння основних видів металодетекторів.

Табл. 1 надає загальний огляд ключових характеристик кожного типу металодетектора. Як зображено на табл. 1, кожен тип металодетектора має свої переваги та недоліки. Найкращі характеристики щодо дискримінації різних типів металів має металодетектор типу VLF, який здатний досить точно розрізняти метали, зокрема немагнітні [4]. У при оцінці максимальної глибини виявлення великих металевих об'єктів найбільш ефективними є металодетектори типу PI, певні спеціалізовані моделі якого здатні виявляти об'єкти на глибині до 12 м [6]. З точки зору чутливості до виявлення малих об'єктів, таких як мідна монета, металодетектор

типу PI також демонструє найкращі характеристики та здатний виявляти їх на глибині до 40 см. Крім того, він ефективніше працює у високомінералізованих ґрунтах [4]. Перевагою металодетекторів типу BFO є простота конструкції, що робить їх дешевими та енергоощадними.

Таблиця 1

Характеристики основних типів металодетекторів

Характеристика	VLF (Дуже Низька Частота)	PI (Імпульсна Індукція)	BFO (Осцилятор Частоти Биття)
Робоча частота, kHz	3–30	0.1–4	100
Дискримінація	Високі можливості; здатність розрізняти різні типи металів.	Обмежена; може виявляти метали, але не розрізняти їх типи.	Обмежені; не може точно розрізняти різні типи металів; погано виявляє немагнітні метали.
Максимальна глибина виявлення великих об'єктів, м	0.5	12	0.3
Максимальна глибина виявлення мідної монети, см	30	40	7.62
Вартість та складність	Менш дорогі	Дорожчі та важчі	Найменш складні та найдешевші, але обмежені сучасні опції.
Споживання енергії	Звичайне споживання.	Високе споживання через потужні імпульси.	Низьке споживання завдяки простоті конструкції.

Для покращення характеристик металодетекторів використовуються різноманітні технології. Багаточастотність дозволяє металодетекторам типу VLF працювати на кількох частотах одночасно, що забезпечує кращу адаптацію до різних ґрунтових умов і збільшує ефективність виявлення різних типів металів [7]. Використання декількох частот також допомагає оптимізувати пошук малих об'єктів або об'єктів, що знаходяться на значній глибині.

Підсилення прийнятого сигналу безпосередньо на котушці включає підсилення слабких сигналів прямо на приймачі перед їхньою обробкою. Такий підхід дозволяє зменшити вплив зовнішніх шумів і підвищити чутливість детектора до слабких сигналів, сприяючи кращому виявленню глибоко заляглих або малорозмірних об'єктів [8].

Інтеграція з геоінформаційними системами (ГІС) дозволяє візуалізувати місця знаходження об'єктів на карті, що є особливо корисним для гуманітарного розмінування, археологічних та геологічних досліджень. Це дозволяє точно планувати подальші дії на місцевості та аналізувати геодані в контексті інших досліджень.

Класифікація та ідентифікація прийнятих об'єктів є перспективним напрямком, що активно розвивається за допомогою алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу сигналів і класифікації та ідентифікації об'єктів. Останні дослідження показують, що інтеграція даної технології у металодетектори може допомогти класифікувати різні типи об'єктів, включаючи вибухонебезпечні об'єкти [9]. Ці технології значно покращують характеристики виявлення металодетекторів. Оскільки металопрошукачі зазвичай використовуються для польових досліджень як переносні системи, крім покращення обробки сигналів, важливими завданнями для покращення даного класу технологій є мініатюризація та зниження енергоспоживання.

За кількістю активних досліджень, що стосуються георадарного методу (GPR), можна зробити висновок, що на дану технологію припадає чи не найбільший потенціал для розвитку серед інших способів виявлення об'єктів у ґрунтів.

Основна перевага GPR полягає у здатності виявляти як і неметалеві, слабо металізовані так і металеві об'єкти. Найпоширеніші системи, що використовують GPR, включають ручні прилади, наземні транспортні засоби та, останнім часом, безпілотні літальні апарати (БПЛА).

На рис. 4 зображена схема роботи GPR. Даний пристрій включає такі основні компоненти: генератор імпульсів: відповідає за створення коротких електромагнітних імпульсів, які випромінюються у ґрунт через передавальну антену; передавач: включає передавальну антену, що випромінює електромагнітні імпульси в землю для взаємодії з різними матеріалами та структурами під поверхнею; приймач: включає приймальну антену, яка збирає відбиті сигнали від об'єктів під землею, створюючи сигнал для аналізу; аналізатор: обробляє прийняті сигнали, визначаючи характеристики та розташування об'єктів, включаючи глибину, форму та матеріал; блок індикації: відображає результати аналізу на візуальному інтерфейсі, надаючи користувачу інформацію для інтерпретації та подальших дій.

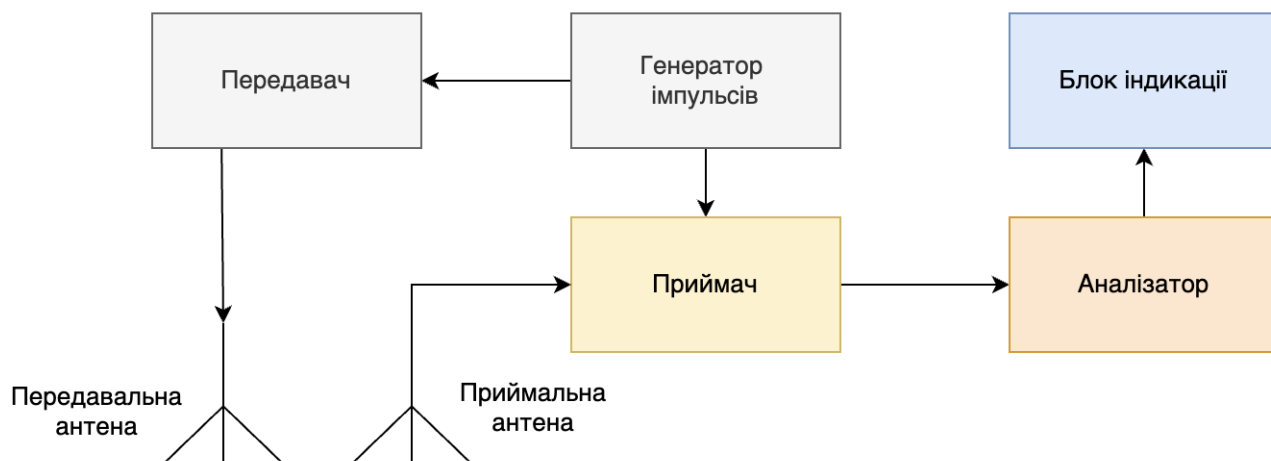


Рис. 4. Схема роботи GPR

Антену георадара, що складається з передавальних та приймальних елементів, розміщується на поверхні землі або досліджуваного матеріалу, або дуже близько до них, і переміщується для проведення сканування області. Шляхом постійного висилання імпульсів та реєстрації відповідних відбитків можна сформувати радіограму шару ґрунту і переглянути її у режимі реального часу на відповідному екрані (ПК/планшет).

У традиційних системах георадара застосовується метод «еквівалентної вибірки часу», що передбачає відправлення нового імпульсу з передавальної антени для кожного зчитування, яке реєструється приймачем. Такі системи відомі як звичайні георадари. Проте сучасні компоненти дозволяють застосовувати метод «вибірки в режимі реального часу» (RTS), який використовується в проектах, таких як Impulse Radar. Цей метод передбачає захоплення «реального» сигналу без повторення циклу передачі-запису, що дозволяє системі збирати дані значно швидше, ніж традиційні георадари [10].

Основними напрямками поточних досліджень для покращення точності розпізнавань є методи пов'язані з машинним навчанням, зокрема, метод машинного навчання з підкріпленням [11].

Одним з перспективних шляхів покращення якості розпізнавання об'єктів GPR радарми та металодетекторами у доповненні до машинного навчання є краще розуміння та

аналіз електромагнітних сигнатур наземних об'єктів у широкому діапазоні частот, починаючи з тих, що використовуються як для радарів, як правило, від кількох 100 МГц до кількох ГГц, так і для металошукачів, від кількох кГц до десятків кГц.

Покращення в програмно-визначуваних радіостанціях (Software Defined Radios, SDR) показало, що окрім основного використання у галузі радіозв'язку, високі пропускні можливості також відкривають можливість реалізації радарів короткого радіуса дії для використання на БПЛА [12]. Основні інновації у цьому напрямку включають мінімізацію ваги та споживання енергії радарної системи для подовження часу польоту БПЛА або використання менших літальних апаратів; покращення чутливості радіочастотного переднього кінця, що знижує потребу у потужності для передачі радіочастот. Зокрема, було розроблено радар зі ступінчастою частотою неперервної хвилі (Stepped Frequency Continuous Wave, SFCW) з використанням удосконаленої архітектури супергетеродинного передавача, що поєднує аналогові та цифрові дизайнерські техніки на компактній друкованій платі (PCB). Це дозволяє незалежну роботу радарної системи, яка, разом з підходящим антенним розміщенням, ефективно виявляє міни навіть в умовах, коли поверхня покрита рослинністю [13].

Метод з використанням магнітометра (MAG) базується на вимірюванні магнітного поля навколо об'єктів, що можуть містити феромагнітні матеріали, як от металеві об'єкти. Основна ідея полягає в тому, що ці об'єкти змінюють магнітне поле навколо себе, і такі зміни можна виявити за допомогою магнітометричних вимірювань. Магнітометр реєструє магнітне поле в певній області, а аналіз магнітних аномалій дозволяє визначити зони, де можуть бути розташовані металеві об'єкти. Цей метод корисний для виявлення металевих об'єктів, оскільки вони часто взаємодіють з магнітним полем.

На рис. 5 зображена схема роботи магнітометричних пристроїв. Основним компонентом у пристроях даного типу є магнітометр. Дослідження та покращення магнітометричних сенсорів можуть значно покращити пристрої даного типу.

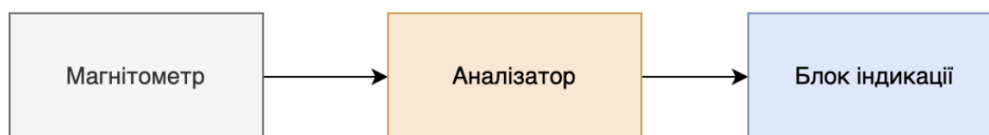


Рис. 5. Схема роботи металодетекторів, що працюють за принципом магнітометрії

Важливим нововведенням є використання квантового магнітометра на базі кремнієвих спин-кубітів, який, згідно з патентом Pierre Gandolfo [14], демонструє значно підвищену чутливість та точність у вимірюванні магнітних полів.

Проте варто зауважити, що не всі вибухонебезпечні предмети мають феромагнітні складові, і можуть бути виготовлені з інших матеріалів, що ускладнює їх виявлення. Існують дослідження використання магнітометрів на безпілотних літальних апаратах для виявлення мін, реальні польові тести показали, що тривимірний флюксейтовий магнітометр, розміщений на відстані 70 см від мотора дрона та утримуваний на висоті близько 1 метра, успішно виявив металеві протипіхотні (M16) та протитанкові (M15) міни. Також було виявлено міни з низьким металевим вмістом (M19), хоча міна з низьким металевим вмістом протипіхотного типу (M14) не була виявлена [15]. Для виявлення слабо металізованих об'єктів можуть бути використані сенсори типу TMR (магнітний тунельний сенсор). Відповідно до дослідження Van Thanh Pham та ін. дані сенсори демонструють можливість виявляти металеві об'єкти розмірами в декілька міліметрів [16].

Застосування пристроїв, що функціонують виключно на основі магнітометра, часто не забезпечує достатньої інформативності, особливо в контексті виявлення вибухонебезпечних пристроїв. Однак, інтеграція цих технологій з іншими детекційними методами може значно покращити результати. Дослідження Лі Юнгхан та ін. якраз і демонструють вдалий приклад інтеграції сенсорів MAG із системою GPR на базі БПЛА [17]. Таким чином, майбутнє розвитку цієї технології для виявлення об'єктів у поверхневих шарах ґрунту має полягати у розробці нових сенсорів з підвищеною чутливістю та їх комплексній інтеграції з іншими видами детекторів.

Щодо методу лазерної доплерівської віброметрії (LDV), варто відзначити, що він використовується для контролю малорозмірних або тонкостінних об'єктів. Фотодетектори, такі як фотодіоди та фотопомножувачі, що входять до складу лазерних віброметрів, реагують на інтенсивність випромінювання. Для отримання інформації про частоту, фазу або поляризацію оптичного сигналу, що відбивається від об'єкта, використовуються різні оптичні дискримінатори та лінзи.

Лазерні доплерівські давачі вібрацій відображають концепцію безконтактного вимірювання з найбільшою повнотою. Доплерівське зміщення частоти, що виникає внаслідок випромінювання лазера на рухомих об'єктах або поверхнях, є добре вивченим явищем. Однак до появи лазерних джерел було обмежено можливість вимірювати високі швидкості через спектрометричні проблеми. Лазерне випромінювання, завдяки високій монохроматичності, має значно кращі параметри розповсюдження та інтенсивності пучка, порівняно з іншими джерелами. Це дозволяє вимірювати навіть менші поперечні розміри розсіяння з високим кутовим розділенням. Крім того, висока монохроматичність дозволяє використовувати такі методи обробки світлового сигналу, як гетеродинне детектування і вузько полосну фільтрацію.

На рис. 6 зображена схема роботи пристроїв, що працюють за методом лазерної віброметрії.

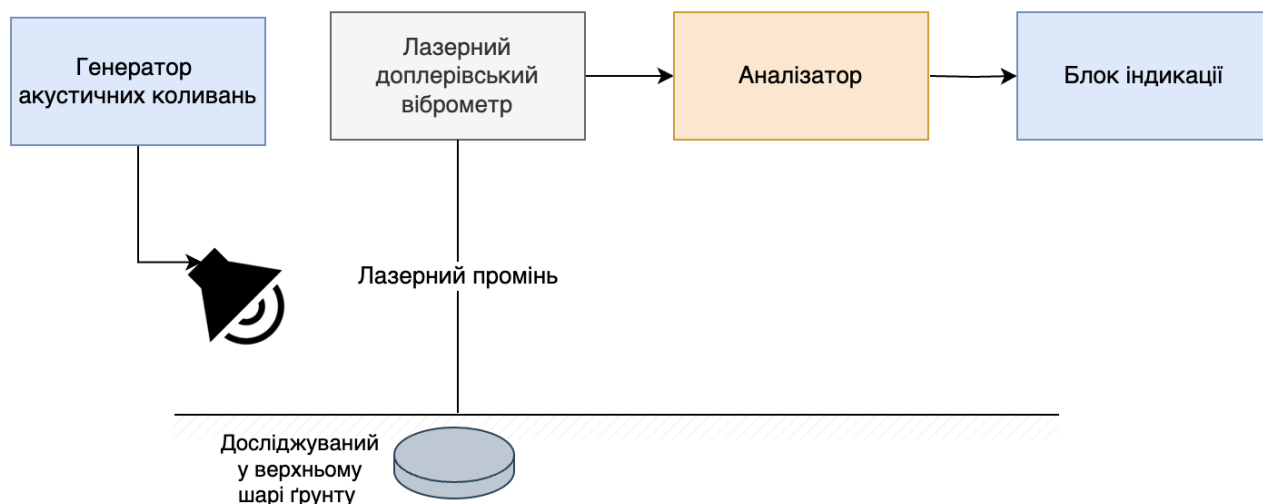


Рис. 6. Схема роботи пристроїв що працюють за принципом лазерної віброметрії

Переваги використання цього методу у виявленні об'єктів, прихованих у ґрунті, включають швидкість сканування та можливість виявлення різних типів об'єктів незалежно від їхніх матеріалів. Прискорення процесу сканування досягається за допомогою багатопроменевих доплерівських віброметрів (MB-LDV). Важливе дослідження, де було застосовано систему MB-LDV для сканування ділянки землі, продемонструвало високу ефективність цієї технології: експериментальна система швидко виявила всі об'єкти, що

підтверджує її здатність до ефективної та швидкої роботи [18]. Ці характеристики вказують на значний потенціал її застосування у галузі виявлення об'єктів під землею.

Оптичні методи є значущою групою технологій для виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту. До таких методів належать лазерне сканування (LIDAR), мультиспектральний та гіперспектральний імеджінг, тепловізійна зйомка, а також використання оптичних датчиків. Хоча ці технології зазвичай не можуть використовуватися як самостійні для проникнення в ґрунт і візуалізації прихованих об'єктів, вони ефективні для виявлення нерівностей поверхні, різниці температур та частково прихованих об'єктів. Оптичні методи можуть бути особливо корисними в поєднанні з іншими технологіями для ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів, зокрема вибухових пристроїв. Інтеграція оптичного виявлення з безпілотними технологіями або застосування в наземних системах може значно підвищити безпеку операторів під час проведення досліджень.

Недавні дослідження показують значний прогрес у використанні оптичних технологій для виявлення вибухових об'єктів. Згідно з дослідженням, опублікованим Роров, Mikhail та співавторами [19] (2021), комбінація оптичних даних з різних давачів, отриманих з БПЛА, дозволяє з високою точністю визначати місцезнаходження мін у верхніх шарах ґрунту. Це стає можливим завдяки статистичній обробці зображень для уточнення інтерпретації даних [19]. Додатково, дослідження, проведене Vivoli, Emanuele та іншими (2024), розробило інноваційну систему для реального часу виявлення мін, яка інтегрована у роботизований комплекс для розмінування. Ця система забезпечує високу швидкість обробки зображень (2.6 кадрів за секунду) та можливість керування через веб-переглядачі та мобільні пристрої, що підвищує її доступність та зручність використання в польових умовах [20].

Ці дослідження підкреслюють потенціал інтеграції різних оптичних технологій з сучасними системами аналізу даних для забезпечення ефективного та безпечного виявлення вибухонебезпечних предметів у різних умовах.

Висновки. У рамках проведеного дослідження було здійснено порівняльний аналіз сучасних технологій виявлення об'єктів у верхніх шарах ґрунту, включаючи георадари (GPR), металодетектори, лазерну доплерівську віброметрію, магнітометрію та оптичні методи. Аналіз показав, що кожен із цих методів має свої унікальні переваги та недоліки, залежно від типу об'єктів, які потрібно виявити, та умов, у яких вони застосовуються. Було встановлено, що інтеграція різних технологій може значно підвищити ефективність виявлення, особливо при використанні машинного навчання для обробки сигналів та класифікації об'єктів.

Ключовим аспектом сучасних досліджень є розвиток методів, які дозволяють зменшити масу та енергоспоживання приладів, щоб вони могли ефективно використовуватися на безпілотних наземних і літальних апаратах. Це стає все більш актуальним у контексті глобального зростання вимог до мобільності та автономності дослідницьких систем.

Алгоритми машинного навчання та створення баз даних сигнатур різних об'єктів відкривають значні можливості для покращення точності виявлення та мінімізації помилкових спрацювань. Ці технології здатні радикально трансформувати методики виявлення, забезпечуючи вищу надійність та точність при ідентифікації об'єктів у складних умовах.

Таким чином, подальші дослідження можуть бути зосереджені на наступних напрямках: інтеграція різних методів виявлення в єдину схему, що дозволить вирішити дану проблематику більш комплексно та багатовимірно, зокрема інтеграція оптичних систем з металодетекторами та GPR; розробка більш енергоефективних та мініатюрних систем на кристалах, які підвищують ефективність використання даних методів у безпілотних літальних апаратах; дослідження та вдосконалення сенсорів, таких як магнітометри для польових досліджень, що може значно підвищити їхню чутливість та точність вимірювань; побудова

масивів сенсорів та вдосконалення обробки сигналів, що сприятиме більш точному проведенню досліджень.

References

1. Bilshe chverti Ukrayiny vsteleno minamy: shcho vidomo [More than a quarter of Ukraine is covered with mines: what is known]. *Fakty = Facts*, 04.04.2024. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240404-bilshe-chverti-ukrayiny-vsteleno-minamy-shho-vidomo/> [in Ukrainian].
2. Ukraine is now the most mined country. It will take decades to make safe. *The Washington Post*, 22.07.2023. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/>
3. Al-Bayati, A., Sturgill, R., Panzer, L., Shani, M. V., Omer, T. (2022). Locating underground utilities in the United States: A comparative analysis of services provided by private locators. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 16, 100707, DOI: 10.1016/j.trip.2022.100707.
4. Overton, G., Moreland, C. (2015). *Metal Detector*. 2nd ed. Corvallis, Oregon: Geotech Press. P. 13–16, 84, 143–146, 27, 69–73, 105–109.
5. Comparing VLF and PI Metal Detectors in Hot Mineralized Soil. *Kellyco Metal Detectors*. URL: <https://kellycodetectors.com/blog/comparing-vlf-and-pi-metal-detectors-in-hot-mineralized-soil/>
6. How Deep Can A Metal Detector Detect? URL: <https://metaldetectorfieldguide.com/deep-can-a-metal-detector-detect/>
7. Wang, Z., Jiang, H. J., Luo, Z. P., Zheng, F. F., Xiao, K. Z., Qu, S. H., Wu, M. W. (2023). Research on Metal Target Classification Method Based on Multi-Frequency Electromagnetic Induction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. 2447. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2447/1/012002.
8. Tang, Z. R., Carter, L. J. (2011). Metal detector head analysis. *Fifth International Conference on Sensing Technology*, Palmerston North, New Zealand. P. 93–96. DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076.
9. Safatly, L., Baydoun, M., Alipour, M., Al Takach, A., Atab, K., Hussein, M., El-Hajj, A., Ghaziri, H. (2020). Detection and classification of landmines using machine learning applied to metal detector data. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 33. P. 1–24. DOI: 10.1080/0952813X.2020.1735529.

Література

1. Більше чверті України встелено мінами: що відомо. *Факти*. 04.04.2024. URL: <https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20240404-bilshe-chverti-ukrayiny-vsteleno-minamy-shho-vidomo/>
2. Ukraine is now the most mined country. It will take decades to make safe. *The Washington Post*. 22.07.2023. URL: <https://www.washingtonpost.com/world/2023/07/22/ukraine-is-now-most-mined-country-it-will-take-decades-make-safe/>
3. Al-Bayati A., Sturgill R., Panzer L., Shani M. V., Omer T. Locating underground utilities in the United States: A comparative analysis of services provided by private locators. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2022. No. 16. Art. 100707. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100707.
4. Overton G., Moreland C. *Metal Detector*. 2nd ed. Corvallis, Oregon: Geotech Press, 2015.
5. Comparing VLF and PI Metal Detectors in Hot Mineralized Soil. *Kellyco Metal Detectors*. URL: <https://kellycodetectors.com/blog/comparing-vlf-and-pi-metal-detectors-in-hot-mineralized-soil/>
6. How Deep Can A Metal Detector Detect? URL: <https://metaldetectorfieldguide.com/deep-can-a-metal-detector-detect/>
7. Wang Z., Jiang H. J., Luo Z. P., Zheng F. F., Xiao K. Z., Qu S. H., Wu M. W. Research on Metal Target Classification Method Based on Multi-Frequency Electromagnetic Induction. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. No. 2447. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2447/1/012002.
8. Tang Z. R., Carter L. J. Metal detector head analysis. *Fifth International Conference on Sensing Technology*. Palmerston North, New Zealand, 2011. P. 93–96, DOI: 10.1109/ICSensT.2011.6137076.
9. Safatly L., Baydoun M., Alipour M., Al Takach A., Atab K., Hussein M., El-Hajj A., Ghaziri H. Detection and classification of landmines using machine learning applied to metal detector data. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*. 2020. Vol. 33. P. 1–24. DOI: 10.1080/0952813X.2020.1735529.

10. Impulse Radar GPR Technology. *Impulse Radar*. URL: <https://impulseradargpr.com/technology/>
11. Alpdemir, M. N., Sezgin, M. (2024). A reinforcement learning (RL)-based hybrid method for ground penetrating radar (GPR)-driven buried object detection. *Neural Computing and Applications*, Vol. 36. DOI: 10.1007/s00521-024-09466-8.
12. Jendo, J., Pasternak, M. (2019). Ground penetrating radar prototype based on a low-cost software defined radio platform. Faculty of Electronics, Military University of Technology, Poland. DOI: 10.15199/48.2019.09.07.
13. Sipos, D., Gleich, D. (2020). A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection. *Sensors*, Vol. 20, P. 2234. DOI: 10.3390/s20082234.
14. Silicon-based spin-qubit quantum magnetometer and radar system with all electrical control: pat. 11,894,475 USA: G01R. № 2024; Pierre Gandolfo; pub. 2024.
15. Yoo, L.-S., Lee, J. H., Ko, S.-H., Jung, S.-K., Lee, S.-H., Lee, Y.-K. (2020). A Drone Fitted With a Magnetometer Detects Landmines. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, P. 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2962062.
16. Pham, V. T., Lien, T. T. N., Nam, L. V. (2024). Design and Characteristics of Contactless Small-magnetic-metal Detector Base on Tunnel Magnetoresistance Sensors in Differential Circuit. *VNU Journal of Science: Mathematics – Physics*, Vol. 10. DOI: 10.25073/2588-1124/vnumap.4909.
17. Lee, J. H., Lee, H. S., Ko, S. P., Ji, D. H., Hyeon, J. W. (2023). Modeling and Implementation of a Joint Airborne Ground Penetrating Radar and Magnetometer System for Landmine Detection. *Remote Sensing*, Vol. 15, P. 3813. DOI: 10.3390/rs15153813.
18. Aranchuk, V., Lal, A., Zhang, H., Hess, C., Sabatier, J. (2004). Acoustic sensor for landmine detection using a continuously scanning multibeam LDV. *Proc SPIE*, 2004. DOI: 10.1117/12.541562.
19. Popov, M., Stankevich, S., Mosov, S., Titarenko, O., Topolnytskyi, M., Dugin, S. (2021). Landmine Detection with UAV-based Optical Data Fusion. P. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
20. Vivoli, E., Bertini, M., Capineri, L. (2024). Deep Learning-Based Real-Time Detection of Surface
10. Impulse Radar GPR Technology. *Impulse Radar*. URL: <https://impulseradargpr.com/technology/>
11. Alpdemir M. N., Sezgin M. A reinforcement learning (RL)-based hybrid method for ground penetrating radar (GPR)-driven buried object detection. *Neural Computing and Applications*. 2024. Vol. 36. DOI: 10.1007/s00521-024-09466-8.
12. Jendo J., Pasternak M. Ground penetrating radar prototype based on a low-cost software defined radio platform. Faculty of Electronics, Military University of Technology, Poland, 2019. DOI: 10.15199/48.2019.09.07.
13. Sipos D., Gleich D. A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection. *Sensors*. 2020. Vol. 20. P. 2234. DOI: 10.3390/s20082234.
14. Silicon-based spin-qubit quantum magnetometer and radar system with all electrical control: pat. 11,894,475 USA: G01R. № 2024; Pierre Gandolfo; pub. 2024.
15. Yoo L.-S., Lee J. H., Ko S.-H., Jung S.-K., Lee S.-H., Lee Y.-K. A Drone Fitted With a Magnetometer Detects Landmines. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2962062.
16. Pham V. T., Lien T. T. N., Nam L. V. Design and Characteristics of Contactless Small-magnetic-metal Detector Base on Tunnel Magnetoresistance Sensors in Differential Circuit. *VNU Journal of Science: Mathematics – Physics*. 2024. Vol. 10. DOI: 10.25073/2588-1124/vnumap.4909.
17. Lee J. H., Lee H. S., Ko S. P., Ji D. H., Hyeon J. W. Modeling and Implementation of a Joint Airborne Ground Penetrating Radar and Magnetometer System for Landmine Detection. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. P. 3813. DOI: 10.3390/rs15153813.
18. Aranchuk V., Lal A., Zhang H., Hess C., Sabatier J. Acoustic sensor for landmine detection using a continuously scanning multibeam LDV. *Proc SPIE*. 2004. DOI: 10.1117/12.541562.
19. Popov M., Stankevich S., Mosov S., Titarenko O., Topolnytskyi M., Dugin S. Landmine Detection with UAV-based Optical Data Fusion. 2021. P. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
20. Vivoli E., Bertini M., Capineri L. Deep Learning-Based Real-Time Detection of

Landmines Using Optical Imaging. Remote Sensing,
Vol. 16, P. 677. DOI: 10.3390/rs16040677.

Surface Landmines Using Optical Imaging.
Remote Sensing. 2024. Vol. 16. P. 677. DOI:
10.3390/rs16040677

VINTONIAK VITALII

PhD Student, Department of Computer Engineering and Electronics,
Vasyl Stefanyk Precarpathian National University,
Ivano-Frankivsk, Ukraine

<https://orcid.org/0009-0002-1538-1881>

E-mail: vitalii.vintoniak.23a@pnu.edu.ua

VINTONIAK V. M.

Vasyl Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk, Ukraine

**INNOVATIONS IN ELECTRONICS FOR DETECTING OBJECTS
IN SURFACE LAYERS OF SOIL: A REVIEW OF METHODS
AND DIRECTIONS FOR FURTHER IMPROVEMENT**

Purpose. The research in this publication reveals a comprehensive analysis of modern electronic technologies for detecting objects in the surface layers of the ground, assessing their efficiency and accuracy, and identifying promising areas for further innovation and research in this area.

Methodology. To achieve the research objectives, the theoretical analysis of scientific literature, as well as methods of analyzing and summarizing existing data were used. The main research tools were a comparative analysis and classification of the methods used to detect objects in the surface layers of the ground. The solution of scientific problems was carried out using a systematic approach to the selection of materials, the use of inductive and logical analysis, and observation methods to analyze information obtained from the literature.

Findings. The study analyzed the main technologies for detecting objects in the upper layers of the ground: ground penetrating radar (GPR), metal detectors, laser Doppler vibrometry, magnetometry, and optical methods. It was found that the combination of different technologies can significantly improve the accuracy and efficiency of object detection. This work also highlighted the potential of applying machine learning to improve object classification and reduce false positives. Further, it was found that reducing the weight and power consumption of detection systems can facilitate their use on unmanned vehicles, which opens up new prospects for the use of these technologies in remote monitoring and exploration of hard-to-reach areas.

Originality. This paper is the first to systematize and analyze in detail the existing technologies for detecting objects in the upper layers of the ground, including GPR, metal detectors, laser vibrometry, magnetometry, and optical methods, based on criteria such as detection depth, equipment cost, and the possibility of integration with other systems. This comprehensive approach allows us to identify white spots in current research and identify areas for further development of each method, including improving accuracy, reducing power consumption and weight of devices for more efficient use on UAVs and ground operations.

Practical value. Comparison results of such electronic technologies as GPR, metal detectors, laser vibrometry, multispectral imaging have been obtained. The current trends in the development of these technologies and opportunities for further research have been identified.

Keywords: metal detector; magnetometry; GPR; ground penetrating radar; landmine; optical methods; laser vibrometry.