

А. А. Карпов, ад'юнкт (ORCID 0009-0007-9895-1574)

М. В. Кустов, д.т.н., професор, нач. наук.-дослідн. лаб. (ORCID 0000-0002-6960-6399)

Р. В. Корнієнко, к.т.н., с.д., пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0003-4854-283X)

О. О. Іваненко, PhD, нач. каф. (ORCID 0009-0006-8566-0084)

Д. С. Шаріпова, к.псих.н., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-9926-6041)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МЕТОДУ ДЕТЕКЦІЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

Розроблена детальна функціональна схема електромагнітного детектора вибухонебезпечних предметів, яка базується на високопродуктивному цифровому процесорі типу Blackfin. Апаратна частина детектора включає випромінюючу антену, яка генерує електромагнітні хвилі, та приймаючу антену, що реєструє відбитий сигнал. Також до її складу входять блок підсилення сигналу, система автоматичного регулювання підсилення, яка забезпечує стабільність сигналу при змінних умовах середовища, цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі для обробки сигналів у цифровій формі, а також блок таймінгів, що синхронізує всі апаратні компоненти. Така архітектура дозволяє здійснювати ефективний збір та обробку даних з високою швидкістю передавання та забезпечує оперативне оновлення синхроімпульсів для перетворювачів. На основі розробленого прототипу детектора була проведена комплексна експериментальна перевірка, метою якої було підтвердження адекватності раніше створених теоретичних моделей, описаних у попередніх дослідженнях. Експерименти показали, що електромагнітні властивості середовища, зокрема рівень обводненості ґрунту, а також геометричні параметри вибухонебезпечного об'єкта і його конструктивні особливості, істотно впливають на результати детектування. Аналіз радіолокаційних зображень, отриманих під час тестування детектора на зразках мін типу ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62, підтвердив ефективність розробленого підходу. Зокрема, детектор демонструє здатність виявляти міну ТМ-62 на глибинах до 50 см, а для протипіхотних мін (ПМН-2 та ПФМ-1) ефективна глибина детектування становить до 20 см. Ці показники повністю відповідають тактичним вимогам до виявлення протипіхотних та протитанкових мін. Для подальшого підвищення точності розпізнавання та роздільної здатності сигналів пропонується застосування сучасних математичних моделей та методів обробки потоку даних.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, гуманітарне розмінування, електромагнітне випромінювання, радіолокаційна карта

1. Вступ

Стан мінної безпеки в Україні залишається критичним через масштабне замінування територій унаслідок військових дій. На сьогодні потенційно небезпечними є понад 140 тисяч квадратних кілометрів, що потребують гуманітарного розмінування. Основні зусилля зосереджені на звільнених територіях, де піротехнічні підрозділи активно очищують землі від мін і вибухонебезпечних залишків. За інформацією станом на 2024 рік, знешкоджено понад 117 тисяч вибухонебезпечних предметів (ВНП), очищено дороги, залізничні шляхи та інші важливі об'єкти інфраструктури [1].

Пріоритетними залишаються аграрні землі, адже відновлення їхньої безпеки є важливим для стабілізації економіки. Використовуються сучасні технології, зокрема дрони, георадари та роботизовані системи, що пришвидшують процес і зменшують ризики для саперів. Однак робота ускладнюється через активні бойові дії та масштабність забруднених територій. Повне розмінування може зайняти десятиліття, але частина територій планується очистити протягом кількох років завдяки підтримці міжнародних організацій і передовому обладнанню.

Окрім України досвід гуманітарного розмінування активно накопичується в різних країнах світу. Зокрема, Камбоджа є однією з найбільш забруднених мінними полями країн, де працюють як місцеві, так і міжнародні організації. В Афганістані для розмінування активно застосовують інноваційні технології, зокрема дрони. У Колумбії проблема мінування виникла через тривалий збройний конфлікт, і процес очищення територій залишається складним. Хорватія демонструє технологічно розвинені підходи до розмінування, напрацьовані після війни на Балканах.

Гуманітарне розмінування в Україні регламентується низкою документів. Основним є Закон України «Про протимінну діяльність в Україні», ухвалений у 2019 році. Також застосовуються міжнародні стандарти протимінної діяльності (IMAS), які визначають загальні правила та підходи до розмінування. Україна є учасницею Оттавської конвенції, що забороняє використання протипіхотних мін. Крім того, діяльність у цій сфері регулюється наказами Міністерства оборони України.

В Україні гуманітарним розмінуванням займаються різні організації, як міжнародні, так і національні. Серед них – Міжнародний комітет Червоного Хреста (ICRC), який надає допомогу постраждалим у конфліктах. Британська благодійна організація The HALO Trust та група MAG (Mines Advisory Group) спеціалізуються на виявленні та знешкодженні мін у різних країнах світу. В Україні ці завдання виконує Державна спеціальна служба транспорту, а також активну роль у розмінуванні відіграє Організація з безпеки і співробітництва в Європі (ОБСЄ). Однак незважаючи на активну роботу цих організацій основне навантаження по виявленню та знешкодженню вибухонебезпечних предметів несе ДСНС України.

Щоб зменшити небезпеку при проведенні розмінування, важливо забезпечити якісну підготовку персоналу, який займається цими роботами. Використання дистанційних технологій, таких як дрони та роботи, дозволяє мінімізувати ризики для людей. Також необхідно суворо дотримуватись міжнародних стандартів безпеки та застосовувати сучасне обладнання, яке підвищує ефективність і безпечність процесу. Крім того, інформування місцевого населення про наявність небезпечних зон є ключовим заходом для запобігання випадковим травмам і нещасним випадкам.

Однак гуманітарне розмінування стикається з низкою проблем. По-перше, це значні площі забруднених територій, які потребують очищення. По-друге, обмеженість ресурсів, зокрема фінансування, спеціалізованого обладнання та кваліфікованого персоналу. Третім викликом є високий рівень небезпеки для фахівців, які виконують ці роботи. Крім того, недостатня обізнаність населення про ризики мін також ускладнює ситуацію. Останньою проблемою є значна тривалість процесу розмінування, що вимагає багато часу.

Таким чином, відсутність ефективних методів та способів для швидкого та безпечного очищення території України від вибухонебезпечних предметів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Більшість систем електромагнітного зондування предметів на землі працюють у діапазоні довжин хвиль, порівнянному з їхніми розмірами, що відрізняє їх від класичних радіолокаційних систем. Антена може перебувати близько до поверхні відбиття (ближнє поле, індукційна передача) або працювати

в далекому полі. Основні технічні проблеми – високий рівень перешкод на малих відстанях і низьке співвідношення сигнал/шум, що ускладнює проектування таких систем [2, 3].

Радіолокаційні системи ближнього зондування поверхні землі діляться на два типи: ті, що працюють у тимчасовій області (передають імпульси й аналізують відбитий сигнал) і в частотній області (сканують окремі частоти). Ручні електромагнітні сканери використовують переносні антени, що переміщуються за заданим маршрутом, створюючи радіолокаційні зображення або звукові попередження про ціль. Транспортні та повітряні системи застосовують великі антени і рух платформи для збору даних, що обробляються методами SAR [4].

Через значні втрати на шляху поширення електромагнітних хвиль у ґрунті довжина хвилі випромінювання, що випускається, перевищуватиме або матиме той самий порядок величини, що й розмір міни. У той час як звичайні радіолокаційні системи працюють на довжинах хвиль, де розмір цілі зазвичай набагато більший за довжину хвилі падаючого випромінювання, радары для сканування поверхні землі працюють в діапазоні від Релея до Мі (або резонансу). Сумарні втрати на кількох довжинах хвиль можуть сягати 100 дБ для деяких матеріалів, а сумарне петлеве посилення таких радарів не перевищує 120 дБ, тому перед розробниками стоїть завдання виявлення ознак наземних предметів за дуже короткий час, зазвичай у межах 20 наносекунд [5]. Відбиття електромагнітної енергії від наземних предметів зумовлене відмінностями в імпедансі наземних мін порівняно із земними матеріалами. Земля містить значну кількість радіолокаційних розсіювачів, таких як каміння, нори тварин і штучне сміття, що призводить до того, що радар стикається з дуже високими рівнями перешкод на коротких відстанях. Подолання цієї проблеми і досягнення адекватного співвідношення сигнал/шум є серйозним технічним завданням. Автор роботи [6] надає більш детальну інформацію про проблеми проектування, пов'язані з виявленням наземних дрібних предметів.

Зображення що формує наземна система електромагнітного сканування, відрізняється від оптичного через порівнянню з об'єктом сканування довжину хвиль, що знижує чіткість і залежить від властивостей ґрунту. Широка діаграма спрямованості, рефракція та анізотропія погіршують роздільну здатність, але її можна поліпшити за допомогою синтезованої апертури. Віддзеркалення виникає через різницю імпедансу цілі та ґрунту; більшість ґрунтів мають діелектричну проникність 2–25, тоді як прісна вода ($\epsilon \approx 80$) дає змогу виявляти об'єкти, на відміну від солоної води [7]. Ґрунт часто неоднорідний, створюючи перешкоди, які важливо враховувати для ефективності радара.

Необроблені радарні зображення містять «яскраві плями» через внутрішні віддзеркалення та спотворення пропорцій через варіації швидкості. Симетричні об'єкти, наприклад сфери, створюють гіперболічні відображення [8]. Обробка даних компенсує ці ефекти, зазвичай в автономному режимі. Георадар може використовувати поляризоване випромінювання для точного виявлення цілей. В роботі [9] розглядаються обмеження радіолокації для пошуку мін і три режими роботи антени: проксимальний (близько до землі), середній (на кілька довжин хвиль) і дистанційний (на значній відстані).

У реактивному ближньому полі енергія залишається в електромагнітних полях біля джерела, не випромінюючись. Натомість відбувається обмін енергією,

і якщо ціль її поглинає, сигнал уловлюється антеною. Точні вимірювання ближнього поля георадарних антен розглянуто в роботі [10]

Радіолокаційні системи вільного простору повинні враховувати лише явища поширення через атмосферу [11, 12]. В роботі показано, що електромагнітні хвилі послаблюються в природних середовищах через втрати в електричному і магнітному полях. У більшості випадків магнітний відгук ґрунту незначний, але в ґрунтах із високим вмістом заліза або вулканічних породах його враховувати необхідно.

В попередніх роботах нами проведено моделювання процесу розповсюдження електромагнітної хвилі у ґрунті із вибухонебезпечним предметом [13]. При цьому враховано процеси відбиття та поглинання хвиль багатопаровими поверхнями ВНП [14] при довільному куті їх падіння. Окрему увагу приділено визначенню діелектричних властивостей матеріалів ВНП [15], що дозволяє підвищити точність детектування та відсортувати хибні сигнали. Отримані моделі успішно пройшли перевірку на працездатність та дозволяють вирішувати поставлені задачі, однак без експериментальної перевірки їх адекватності та достовірності результатів моделювання їх використання суттєво обмежується в практичній галузі. Окрім цього потребує експериментальної перевірки сам метод ідентифікації ВНП з різними характеристиками в реальних умовах.

Таким чином невирішеною частиною проблеми є відсутність експериментальної перевірки методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів та теоретичних моделей цього процесу.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальна перевірка працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів та теоретичних моделей розповсюдження електромагнітних хвиль.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Розробити функціональну схему електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів.
2. Експериментально перевірити адекватність розроблених теоретичних моделей.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є прийнятий сигнал, отриманий шляхом відбиття випроміненого сигналу електромагнітних хвиль неоднорідностями у ґрунті. В якості основних об'єктів опромінення використовувались деактивовані ВНП найбільш поширених типів.

Протипіхотні міни:

ПФМ-1 («Пелюстка») – невеликі фугасні міни, які розкидаються касетними боеприпасами. Вони малопомітні та часто спричиняють каліцтва, особливо серед дітей, через схожість із іграшками.

ПМН-2 – фугасні міни натискної дії, що активуються при наступанні ногою.

ОЗМ-72 («Міна-жаба») – осколкова міна кругового ураження, яка підстрибує при спрацьовуванні.

Протитанкові міни:

ТМ-62 – використовуються для ураження транспортних засобів. Активуються при значному навантаженні.

ПОМ-3 («Медальйон») – новий тип міни з сейсмічним датчиком, що виявляє наближення людини та вибухає.

Предметом дослідження є процес взаємодії (проходження, поглинання, відбиття) електромагнітної хвилі вказаних параметрів із поверхнею ВНП.

Висувається гіпотеза про отримання радіолокаційного сигналу відбиття з достатньою ступеню роздільної здатності для ідентифікації основних типів ВНП у ґрунті з різними характеристиками. Це дозволить оцінити можливість адаптації параметрів промислових георадарів з метою їх використання для практичного виявлення ВНП при гуманітарному розмінуванні.

В якості тестового технічного засобу використовувався георадар VIY5-900 призначений для підповерхневого зондування використовуючи імпульсне електромагнітне випромінювання. Прилад дає змогу досягати глибини зондування до 2 метрів за певних умов.

5. Розробка функціональної схеми електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів

З метою експериментальної перевірки отриманих теоретичних моделей та визначення практичних можливостей електромагнітного методу детектування вибухонебезпечних предметів в роботі розроблена функціональна схема наземного детектору. Основними вимогами при побудові функціональної схеми було реалізація можливості трансформації отриманих аналогових сигналів у цифровий формат, порівняння фаз та амплітуд вихідного та вхідного сигналу та можливість формування візуалізаційної картини прийнятого сигналу та його збереження. Розроблена функціональна схема представлена на рис. 1.

На рис. 1 наведено функціональну схему радіолокаційного модуля, який складається з двох основних вузлів – радіочастотного і цифрового. Радіочастотний вузол класично представлений приймаючою (1, рис. 1) і передаючою антенами (16, рис.1), відповідно, фідерною системою і модулями приймаючого і передаючого підсилювачів.

Основою цифрового вузла виступає цифровий процесор (8, рис.1). В роботі [4] показано, що в якості цифрового процесору можна використовувати процесори Blackfin від виробника Analog Devices. З процесором пов'язані оперативна пам'ять, двоспрямований інтерфейс керування та пристрої виведення аудіо- і цифрового потоків (10, 11 рис. 1).

Цифровий процесор через модуль синхронізації передає цифровий код, відповідний потрібному таймінгу (часовому інтервалу), у вузол формування таймінгів, який, у свою чергу, визначає час роботи генератора імпульсів. Сформований у такий спосіб пакет імпульсів через передавальний підсилювач (підсилювач потужності) і фідерну систему надходить на передавальну антену і випромінюється в простір.

У разі потрапляння переданого сигналу на неоднорідний предмет із чітко виділеною поверхнею розділу між різними матеріалами (міну), він відбивається від нього і приймається приймальною антеною. Сигнал з антени надходить на обробку в блок посилення сигналу (БПС), що змінюється в часі, який слугує для компенсації геометричної втрати діапазону на кожному кроку діапазону, і представляє за своєю суттю систему автоматичного регулювання посилення (АРП), керовану за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Необхідні для роботи блоку БПС параметри формуються процесором 8.

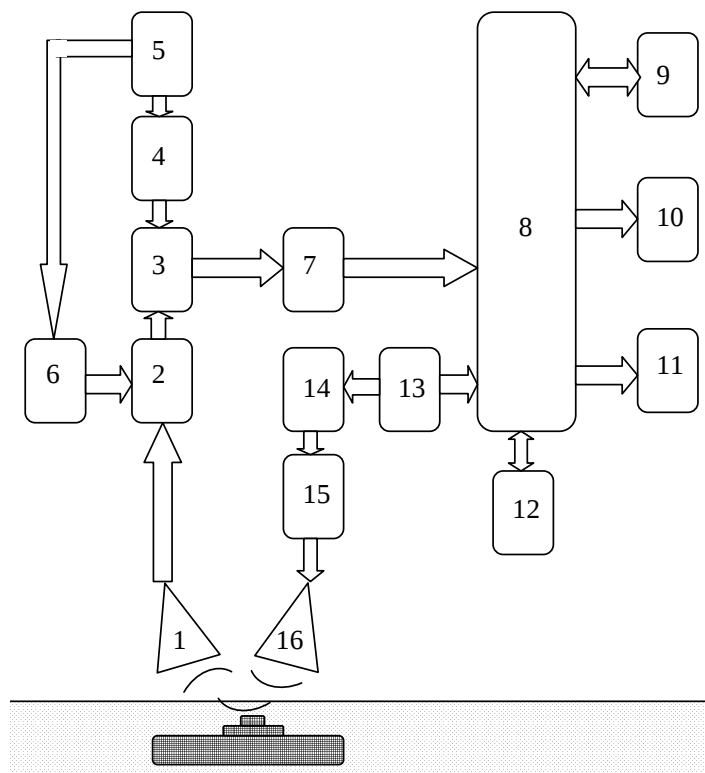


Рис. 1. Функціональна схема радіолокаційного модуля для електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів: 1 – приймаюча антена; 2 – підсилення сигналу, що змінюється у часі; 3 – відбір та затримка сигналу; 4 – блок таймінгів; 5, 6 – цифрово-аналоговий перетворювач; 7 – аналогово-цифровий перетворювач; 8 – цифровий процесор; 9 – інтерфейс керування; 10 – вивід аудіо сигналів; 11 – вивід візуалізованих даних; 12 – блок пам'яті; 13 – модуль синхронізації; 14 – цифровий вузол формування інтервалів затримки; 15 – генератор імпульсів електромагнітного випромінювання; 16 – передаюча антена

З блоку БПС сигнал надходить на блок вибірки і зберігання (затримки), інформація про прийнятий сигнал, з якого за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) перенаправляється в процесор для подальшої цифрової обробки згідно з алгоритмом розпізнавання.

Блок вибірки і зберігання (затримки), своєю чергою, керується і синхронізується за допомогою блоку таймінгів (4, рис. 1) сигналами, що надходять із трьох цифро-аналогових перетворювачів. Цифровий процесор, за допомогою програмного забезпечення, формує необхідні для роботи сигнали.

Дискретизація здійснюється шляхом послідовного збільшення інтервалу повторення імпульсів дискретизації з кожним інтервалом повторення імпульсів аж до досягнення 512 відліків, після чого процес повторюється. Наприклад, крок дискретизації 50 пс додається до зразкового (обраного еталонного) інтервалу повторення імпульсів, що дає змогу запобігти дискретизації прийнятого сигналу через рівні проміжки часу. Використання для створення послідовності пакетів імпульсів повільного темпу, що генерується цифровим способом, і швидкого темпу, що генерується аналоговим способом, дає змогу формувати дискрети з інкрементною синхронізацією.

Як вже було зазначено, програмне забезпечення радара розробляється під відповідну архітектуру процесору і відповідає за збір даних з повною швидкістю

передавання даних 16 Мбіт/с^{-1} , оновлення синхроімпульсів для цифро-аналогових перетворювачів кожні 32 мкс і загальні адміністративні завдання. На додаток до цього процесор виконує алгоритми обробки сигналів, які перетворюють радіолокаційні дані в звук кожні 16 мс. Інші завдання включають в себе зв'язок з іншими пристроями, підключеними до плати радара. Радар споживає може споживати до 2,3 Вт і буде містити усю обробку, необхідну для забезпечення звукового попередження про мінну ціль, як показано на рис. 1.

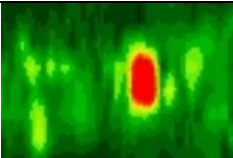
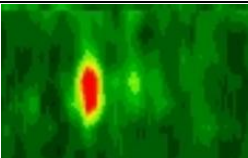
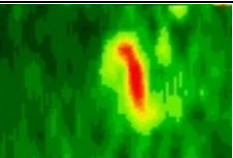
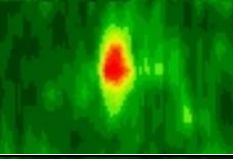
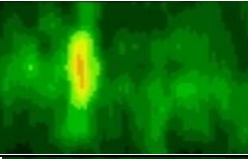
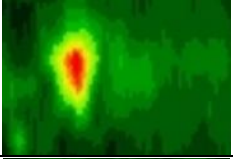
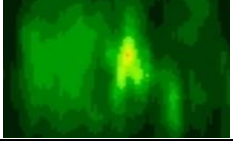
Додаткове використання часово-частотних характеристик, вейвлетів, нейронних мереж, нечітких множин, моделей гауссових сумішей при обробці отриманих результатів дозволить додатково підвищити роздільну здатність та якість отриманих результатів. Можливість використання цих підходів для вирішення подібних задач продемонстровано в роботах [7–9].

6. Експериментальна перевірка адекватності розроблених теоретичних моделей

Експериментальна перевірка адекватності розроблених теоретичних моделей проводилась за наступною методикою. У ґрунті розмішували вибухонебезпечний предмет та проводили проїзд електромагнітним детектором над місцем розміщення ВВП. Для підтвердження отриманих результатів при однакових умовах проводилось три проїзди та знімалась зображення радіолокаційної карти.

Під час експерименту у якості ВВП використовували три види мін: ПФМ-1 («Пелюстка») – фугасна міна, із невеликими розмірами та незначним вмістом металевих конструкційних елементів; ПМН-2 – фугасна міна натискної дії із пластиковим корпусом; ТМ-62 – велика протитранспортна міна із металевим корпусом. Результати експериментальних досліджень представлені у табл. 1 – табл. 3.

Табл. 1. Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ПФМ-1

Глибина/ Ґрунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Вибухонебезпечні предмети розміщувались на глибинах – 5 см, 20 см, 50 см. Більшу глибину розглядати недоцільно так, як на більшій глибині при гуманітарному розмінуванні такі міни практично не зустрічаються. Окрім цього із глибиною потужність відбитого сигналу падає настільки, що такі невеликі міни без металевої оболонки, як ПФМ-1 та ПМН-2 детектувати за допомогою електромагнітного методу технічно практично неможливо.

Табл. 2. Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ПМН-2

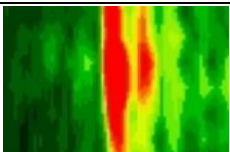
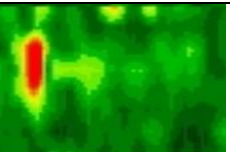
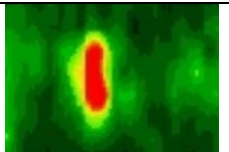
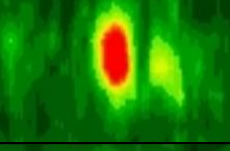
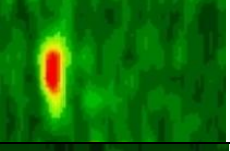
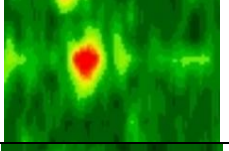
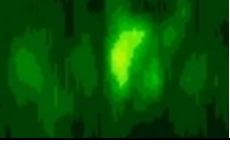
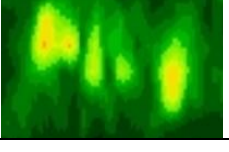
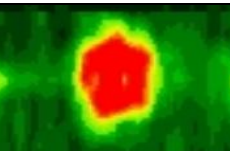
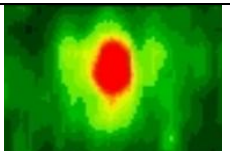
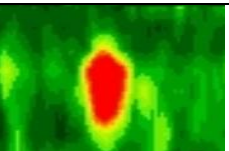
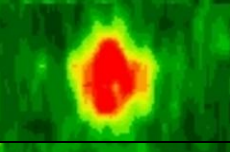
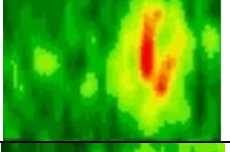
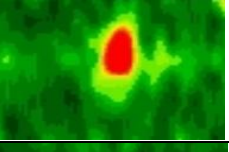
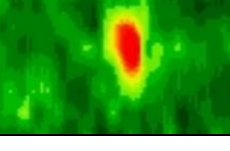
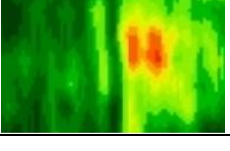
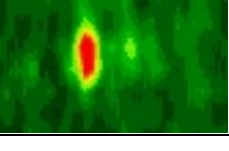
Глибина/ Грунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Табл. 3. Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ТМ-62

Глибина/ Грунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Також при експериментальному дослідженні розглядалось три види ґрунту – сухий пісок, мокрий пісок та суглинок. Ці види ґрунтів є найбільш розповсюдженими.

7. Обговорення результатів експериментальної перевірки адекватності розроблених теоретичних моделей

Аналіз радіолокаційних карт електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів (табл. 1 – табл. 3) показує, що для усіх типів мін у мокрому піску спостерігається найгірша якість детектування. Це пояснюється високим коефіцієнтом поглинання електромагнітних хвиль вологовмісних середовищ. Гірша якість детектування для суглиноків у порівнянні з сухим піском також пояснюється наявністю більшого вмісту води саме у суглинках.

Як і очікувалось найбільш чітку радіолокаційну карту має міна ТМ-62 (табл. 3). За рахунок своїх великих розмірів та металевої оболонки такі міни можна детектувати на глибинах до 50 см, а на глибині до 20 см «плями» відбиття мають чіткі контури навіть без застосування додаткових фільтрів.

Радіолокаційні карти для мін ПФМ-1 (табл. 1) показали, що їх стійке детектування можливо лише на глибинах до 20 см для всіх видів ґрунтів. Також як видно з табл. 1 для детектування на таких глибинах для ґрунтів із великим вмістом води вже необхідним є використання спеціальних фільтрів та алгоритмів обробки сигнала.

лу. Представлені радіолокаційні карти для глибин 20 см ще можна обробити в умовах полігону, коли заздалегідь відомі місця розміщення мін. В реальних умовах результати детектування будуть гіршими. Видно, що для таких протипіхотних мін навіть для умов полігону на глибинах більше 50 см практично не вдалось отримати стійкого сигналу відбиття та отримані результати можна віднести до «шумів».

Протипіхотна міна ПМН-2 (табл. 2) має більш якісні карти електромагнітного детектування у порівнянні з ПФМ-1 (табл. 1). Виходячи з того, що вміст металевих компонент у цих двох мінах приблизно однаковий, це чітко вказує на вплив саме розміру об'єкту детектування. І для таких мін вже можна отримати чітку радіолокаційну карту навіть для глибини 20 см.

Таким чином, аналіз радіолокаційних карт для найбільш розповсюджених видів вибухонебезпечних предметів показав, що проти транспортна міна ТМ-62 якісно детектується електромагнітним методом на достатньо великих глибинах (до 50 см) для всіх найбільш поширених видів ґрунтів. Детектування протипіхотних мін із малим вмістом металевих конструкційних елементів (ПМН-2, ПФМ-1) запропонованим електромагнітним методом має обмеження по глибині та якісний стійкий сигнал спостерігається на глибинах до 20 см. Але протипіхотні міни мають найбільшу руйнівну силу коли вони розташовані на поверхні землі або приховані лише рослинним покривом. Тому виходячи із специфіки застосування цих мін можна зробити висновок про низьку вірогідність їх розташування на глибинах більше 20 см. Враховуючи складність використання інших методів детектування таких мін із незначним вмістом металевих компонентів, ці показники суттєво перевищують аналогічні методи.

Додатково підвищити якість детектування дозволить розробка програмного забезпечення для обробки та фільтрації отриманих електромагнітних сигналів. Це дозволить відсікати хибні сигнали та підвищувати контрастність корисних сигналів. Основою для побудови такого програмного комплексу можуть слугувати математичні моделі розсіювання електромагнітного випромінювання, де враховані конструкційні особливості вибухонебезпечних предметів та характеристики ґрунтів. Саме на це доцільно спрямувати зусилля майбутніх досліджень

8. Висновки

1. Розроблено функціональну схему електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів на основі цифрового процесору Blackfin. Апаратна частина детектору включає випромінюючу та приймаючу антени, блок посилення сигналу, систему автоматичного регулюванням посилення, цифро-аналоговий перетворювачі та блок таймінгів. Така функціональна схема дозволяє організовувати збір даних з повною швидкістю передавання даних 16 Мбіт/с^{-1} , оновлення синхроімпульсів для цифро-аналогових перетворювачів кожні 32 мкс і проводити паралельні загальні адміністративні завдання на процесорі.

2. На основі розробленого детектору проведено експериментальну перевірку адекватності розроблених у попередніх роботах теоретичних моделей. Результати експерименту повністю підтвердили вплив обводненості ґрунтів, розміру об'єкту детектування та конструкційних особливостей вибухонебезпечних предметів. Результати аналізу радіолокаційних карт електромагнітного детектування мін ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62 продемонстрували практичну спроможність використання запропонованого методу для виявлення заглиблених мін. Достатня якість детекції для мін ТМ-62 забезпечується на глибинах до 50 см, а для ПМН-2, ПФМ-1 до 20 см. Ці по-

казники повністю відповідають специфіці використання проти транспортних та протипіхотних мін та показують більшу якість у порівнянні з аналогічними методами. Використання відповідних математичних моделей, методів часово-частотних характеристик, вейвлетів, нейронних мереж, нечітких множин, моделей гауссових сумішей при обробці отриманих результатів дозволить додатково підвищити роздільну здатність та якість отриманих результатів.

Література

1. Требін М. П., Іванов С. В., Мельник О. А., Разумова Г. В. Війна як виклик існуванню цивілізації. Деструктивні мегатенденції сучасності: від пандемії до війни: монографія. Аналіт. центр сучас. гуманітаристики. Харків : Право. 2025. С. 105–130. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/35712>
2. Songtao Li. Study on Ground-Penetrating Radar (GPR) Application in Pavement Deep Distress Detection. *Chengchao Guo Journal of Transportation Technologies*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 18. doi: 10.4236/jtts.2019.92015
3. Frank J. W. P., Anthony J. P., David W. A. GPR combined with a positioning system to detect anti-personnel landmines. 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292660
4. Elsheakh D. M. Linear/circular polarizations slot antennas for millimeter wave applications. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2017. Vol. 59(4). P. 976–983. doi: 10.1002/mop.30435
5. Indelicato A. The Impact of Frequency in Surveying Engineering Slopes Using Ground Penetrating Radar. *International Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 8 № 3. P. 296–304. doi: 10.4236/ijg.2017.83014
6. Saranya S., Sudha G., Rithika B., Alagappan A., Sanjeev D. Ground Penetrating Radar For Identifying Mines In A Minefield. In 2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS) IEEE. 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10780419
7. Abufares L., Chen Y., Al-Qadi I. L. Asphalt concrete density monitoring during compaction using roller-mounted GPR. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 174. P. 106158. doi: 10.1016/j.autcon.2025.106158
8. Liu Y., Zhang Z., Yuan Y., Zhu Y., Wang K. Quantitative Evaluation of Internal Pavement Distresses Based on 3D Ground Penetrating Radar. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2025. Vol. 20(1). P. 45–69. doi: 10.7250/bjrbe.2025-20.653
9. Cui L., Li L., Zhang W., Sun F., Fan D., Zhang H. Advances of deep learning application in qualitative and quantitative detection of road subsurface distress using ground penetrating radar: A review. *Measurement*. 2025. Vol. 247. P. 116760. doi: 10.1016/j.measurement.2025.117007
10. Wang W., Du W., Cheng S., Zhuo J. Numerical Simulation Study on the Impact of Blind Zones in Ground Penetrating Radar. *Sensors*. 2025. Vol. 25(4). P. 1252. doi: 10.3390/s25041252
11. Lambot S., Wu K., Sluÿters A., Vanderdonckt J. The Full-Wave Radar Equation for Wave Propagation in Multilayered Media and Its Applications. *Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications*. 2024. P. 123–160. doi: 10.1002/9781394284405.ch5
12. Sainson S., Sainson L., Sainson S. *Electromagnetic seabed logging*. Springer International Publishing. 2017. Vol. 19. P. 536. doi: 10.1007/978-3-319-45355-2
13. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of elec-
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-3

tromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України. 2023. № 1(37). С. 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

14. Кустов М. В., Кулаков О. В., Карпов А. А., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій: Науковий журнал, Харків: НУЦЗ України. 2024. № 1(39). С. 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6

15. Карпов А. А., Кустов М. В., Кулаков О. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Взаємодія електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. Черкаси: НУЦЗ України. 2024. № 2(40). С. 57–71. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-5

A. Karpov, Adjunct

M. Kustov, DSc, Professor, Head of the Research Laboratory

R. Korniienko, PhD, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department

O. Ivanenko, PhD, Head of the Department

D. Sharipova, PhD, Deputy Head of Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ELECTROMAGNETIC METHOD OF DETECTING EXPLOSIVE OBJECTS

A detailed functional diagram of an electromagnetic explosive detector based on a high-performance digital processor of the Blackfin type has been developed. The hardware part of this detector includes a radiating antenna that generates electromagnetic waves and a receiving antenna that registers the reflected signal. It also includes a signal amplification unit, an automatic gain control system that ensures signal stability under changing environmental conditions, digital-to-analog and analog-to-digital converters for processing signals in digital form, and a timing unit that synchronizes all hardware components. This architecture allows for efficient data collection and processing at high transmission speeds and ensures prompt clock updates for the converters. On the basis of the developed prototype detector, a comprehensive experimental test was carried out to confirm the adequacy of the previously created theoretical models described in previous studies. The experiments showed that the electromagnetic properties of the environment, in particular the level of soil watering, as well as the geometric parameters of the explosive object and its design features, significantly affect the detection results. Analysis of radar images obtained during testing of the detector on samples of PMN-2, PFM-1 and TM-62 mines confirmed the effectiveness of the developed approach. In particular, the detector demonstrates the ability to detect a TM-62 mine at depths of up to 50 cm, and for anti-personnel mines (PMN-2 and PFM-1) the effective detection depth is up to 20 cm. These indicators fully meet the tactical requirements for detecting anti-personnel and anti-tank mines. To further improve the recognition accuracy and signal resolution, it is proposed to use modern mathematical models and methods of data flow processing.

Keywords: explosive ordnance, humanitarian demining, electromagnetic radiation, radar map

References

1. Trebin, M. P. Ivanov, S. V., Melnyk, O. A., Razumova, H. V. (2025). War as a challenge to the existence of civilization. Destructive megatrends of our time: from pandemic to war. *Viina yak vyklyk isnuvanniu tsyvilizatsii. Destruktyvni mehatendentsii suchasnosti: vid pandemii do viiny : monographe*; Kharkiv: Pravo, 105–130. Available at: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/35712>

2. Songtao, Li. (2019). Study on Ground-Penetrating Radar (GPR) Application in Pavement Deep Distress Detection. *Chengchao Guo Journal of Transportation Technologies*, 9(2), 18. doi: 10.4236/jtts.2019.92015

3. Frank, J. W. P., Anthony, J. P., David, W. A. (2015). GPR combined with a positioning system to detect anti-personnel landmines. 8th International Workshop on Ad-

- vanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 1–4. doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292660
4. Elsheakh, D. M. (2017). Linear/circular polarizations slot antennas for millimeter wave applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(4), 976–983. doi: 10.1002/mop.30435
 5. Indelicato, A. (2017). The Impact of Frequency in Surveying Engineering Slopes Using Ground Penetrating Radar. *International Journal of Geosciences*, 8(3), 296–304. doi: 10.4236/ijg.2017.83014
 6. Saranya, S., Sudha, G., Rithika, B., Alagappan, A., Sanjeev, D. (2024). Ground Penetrating Radar For Identifying Mines In A Minefield. In 2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS) IEEE, 1–5. doi: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10780419
 7. Abufares, L., Chen, Y., Al-Qadi, I. L. (2025). Asphalt concrete density monitoring during compaction using roller-mounted GPR. *Automation in Construction*, 174, 106158. doi: 10.1016/j.autcon.2025.106158
 8. Liu, Y., Zhang, Z., Yuan, Y., Zhu, Y., Wang, K. (2025). Quantitative Evaluation of Internal Pavement Distresses Based on 3D Ground Penetrating Radar. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 20(1), 45–69. doi: 10.7250/bjrbe.2025-20.653
 9. Cui, L., Li, L., Zhang, W., Sun, F., Fan, D., Zhang, H. (2025). Advances of deep learning application in qualitative and quantitative detection of road subsurface distress using ground penetrating radar: A review. *Measurement*, 247, 116760. doi: 10.1016/j.measurement.2025.117007
 10. Wang, W., Du, W., Cheng, S., Zhuo, J. (2025). Numerical Simulation Study on the Impact of Blind Zones in Ground Penetrating Radar. *Sensors*, 25(4), 1252. doi: 10.3390/s25041252
 11. Lambot, S., Wu, K., Sluÿters, A., Vanderdonckt, J. (2024). The Full-Wave Radar Equation for Wave Propagation in Multilayered Media and Its Applications. *Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications*, 123–160. doi: 10.1002/9781394284405.ch5
 12. Sainson, S., Sainson, L., Sainson, S. (2017). *Electromagnetic seabed logging*. Springer International Publishing, 19, 536. doi: 10.1007/978-3-319-45355-2
 13. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗ України, 1(37), 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1
 14. Kustov, M. V., Kulakov, O. V., Karpov, A. A., Basmanov, O. YE., Mykhaylovs'ka, YU. V. (2024). Elektrodynamichna model' vzayemodiyi elektromahnitnoyi khvyli z poverkhneyu vybukhonebezpechnoyi rechovyny. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy: Naukovyy zhurnal*, Kharkiv: NUTSZ Ukrayiny, 1 (39). 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6
 15. Karpov, A. A., Kustov, M. V., Kulakov, O. V., Basmanov, O. YE., Mykhaylovs'ka, YU. V. (2024). Vzayemodiya elektromahnitnoyi khvyli z poverkhneyu real'noyi vybu-khonebezpechnoyi rechovyny. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*. Cherkasy: NUTSZ Ukrayiny, 2(40), 57–71. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-5

Надійшла до редколегії: 23.02.2025

Прийнята до друку: 17.04.2025