

Артем Сигута¹, Олексій Красножон²

¹аспірант кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, група АСД-122-22
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: syguta@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

²кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>. ResearcherID: [G-4623-2014](https://orcid.org/G-4623-2014)

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПОШУКУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

Запропонована стаття є оглядовою, її присвячено дослідженню існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів, зокрема, таких, як: георадар, Раманівська спектроскопія та пошук за допомогою терагерцового (THz) сигналу. Георадар - це технологія, яка використовує радіохвилі для виявлення підземних об'єктів. У контексті пошуку вибухонебезпечних предметів, георадар може виявити закопану вибухівку або об'єкти, які можуть бути використані як сховища для неї. Раманівська спектроскопія – це метод аналізу хімічного складу речовини шляхом вимірювання параметрів розсіяного світла на молекулах цієї речовини. Цей метод може використовуватися для виявлення вибухонебезпечної речовини, наприклад, нітрогліцерину, що є основним компонентом багатьох видів вибухівки. Пошук за допомогою THz-сигналу використовує електромагнітні хвилі, частота яких складає одиниці ТГц, для виявлення підозрілих об'єктів. THz-сигнали можуть проникати крізь велику кількість речовин, включаючи текстиль, пластмасу та ін., які можуть бути використані для маскуванню вибухових предметів. Використання георадара, Раманівської спектроскопії та пошуку за допомогою THz-сигналу можуть значно поліпшити можливості пошуку вибухонебезпечних предметів та забезпечити безпеку в громадських місцях та на транспорті.

Ключові слова: міни; вибухонебезпечні предмети; методи пошуку; георадар; Раманівська спектроскопія; терагерцова технологія.

Рис.: 11. Бібл.: 13.

Актуальність теми дослідження. Головною загрозою для цивільного населення після закінчення бойових дій на певній території є наявність вибухонебезпечних предметів, крім того, це є нагальною проблемою безпеки особового складу і під час ведення таких дій. Будь-який конфлікт характеризується застосуванням наземних мін всіма сторонами, і з кожним роком ця тенденція лише посилюється.

Зростання обсягів застосування наземних мін обумовлено такими чинниками [1]:

- високою ефективністю, тобто здатністю виводити з ладу важке озброєння і транспортні засоби, вражати особовий склад та наносити йому важкі поранення;
- простотою конструкції, що забезпечує їх використання персоналом, який має низьку кваліфікацію, або для підготовки якого не потрібно багато часу;
- низькою собівартістю виготовлення.

Загальна картина постійно погіршується небезпекою підризу цивільного населення на боєприпасах, що не розірвалися, і прихованих мінах, яких стає дедалі більше в районах завдання ударів артилерії і авіації. За оцінками спеціалістів Міжнародного Комітету Червоного Хреста у всьому світі на мінах щомісячно підривається близько 800 людей, більшу частину з яких складають цивільні. Особливого занепокоєння викликає факт не відповідності темпів розмінування темпам встановлення: щорічно замість кожних 100 тисяч виявлених та знешкоджених мін встановлюється від 2 до 5 мільйонів нових [1].

Таким чином, проблема пошуку і своєчасного виявлення вибухонебезпечних предметів є дуже важливою і актуальною в контексті війни, що триває зараз, для галузі інформаційних технологій, оскільки вимагає обробки значних обсягів даних.

Постановка проблеми. Як зазначалося вище, належний пошук мін – це найголовніша задача гуманітарного розмінування будь-якої місцевості. Як правило, міни і вибухові пристрої встановлюються із застосуванням різних заходів із маскуванню, причому маскуванню відбувається із використанням різних матеріалів, рідин тощо, які не відносяться до вибухонебезпечних.

Виділяють контактні і безконтактні (дистанційні) методи виявлення вибухонебезпечних предметів. При контактному виявленні необхідна присутність сапера безпосередньо поряд із вибуховим пристроєм, який за допомогою спеціального щупа визначає ступінь порушення цілісності поверхні ґрунту.

Безконтактні методи виявлення є більш безпечними, але вимагають наявності джерел генерації і приймачів сигналів, відбиття яких від об'єктів і обробка пристроями пошуку і підтверджує наявність або відсутність вибухових предметів. Основною проблемою безконтактного виявлення є розпізнавання та виділення корисного (відбитого) сигналу на фоні численних завад і перешкод, спричинених неоднорідністю довкілля, впливом інших джерел випромінювання тощо.

Таким чином, актуальною є проблема дослідження існуючих методів дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів, зокрема, протипіхотних мін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що методи терагерцової технології, георадара та Лазерної Раманівської спектроскопії є ефективними та перспективними у виявленні вибухонебезпечних речовин. Вони характеризуються високою чутливістю, специфічністю та здатністю працювати у реальному часі. Подальші дослідження і розвиток цих методів можуть сприяти покращенню систем безпеки та забезпеченню захисту від потенційних небезпек.

Метод терагерцової технології використовує електромагнітне випромінювання у терагерцовому діапазоні (між мікрохвильовим та інфрачервоним), що дозволяє виявляти та ідентифікувати вибухонебезпечні речовини. Недавні дослідження показують, що терагерцова технологія демонструє високу чутливість до хімічних змін у матеріалах, а також може виявляти навіть дуже низькі концентрації речовин. Застосування терагерцового випромінювання в поєднанні з алгоритмами обробки даних та штучного інтелекту сприяє розробці ефективних систем виявлення вибухонебезпечних матеріалів.

Георадар – це ще один метод, який знаходить застосування в пошуку вибухонебезпечних речовин. Георадар використовує радіохвильове випромінювання для вимірювання властивостей ґрунту або інших матеріалів. Останні дослідження показують, що георадар може виявляти зміни в діелектричних властивостях матеріалів, викликані присутністю вибухонебезпечних речовин. Завдяки високій роздільній та проникаючій здатностям, він може бути ефективним у виявленні вибухонебезпечних матеріалів, які можуть бути прихованими або замаскованими.

Лазерна Раманівська спектроскопія є ще одним перспективним методом виявлення вибухонебезпечних речовин. Вона базується на аналізі розсіяного світла після освітлення лазерним променем. Кожна речовина має свої характеристичні спектри розсіювання, які і можна використовувати для їх ідентифікації. Останні дослідження показують, що Лазерна Раманівська спектроскопія має високу специфічність та чутливість до хімічного складу матеріалів, включаючи вибухонебезпечні речовини. Вона може бути застосована для неінвазивного та швидкого виявлення таких речовин навіть у великих обсягах.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Невирішеним завданням є визначення оптимального (з погляду ефективності і вартості обладнання) методу пошуку вибухонебезпечних предметів в сучасних умовах війни, оскільки на ряду зі старими класичним з'явилися і нові, більш досконалі методи. Тому, необхідно провести дослідження існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів та проаналізувати можливості їх застосування в сучасних умовах.

Мета статті. Метою даної статті є дослідження деяких існуючих методів пошуку вибухонебезпечних предметів як на ділянках ведення бойових дій, так і на цивільних територіях під час гуманітарного розмінування, а також аналіз ефективності їх застосування та визначення напрямів розвитку автоматизованих інструментів пошуку з метою подальшого спрощення процесу знешкодження та очищення територій, зокрема, від протипіхотних мін.

Виклад основного матеріалу. Залежно від цільового призначення всі міни розподіляють на [2]:

- протитанкові (здатні вражати будь-які транспортні засоби);
- протипіхотні (здатні вражати людей, тварин і легку техніку);
- об’єктні (здатні вражати конкретні об’єкти або будівлі);
- спеціалізованого призначення.

Найбільшу складність в процесі розмінування викликає пошук саме протипіхотних мін, що спричинено рядом факторів:

- взимку, коли шар ґрунту промерзає, деякі міни можуть детонувати від надлишкового тиску, тоді як інші можуть не вибухнути навіть якщо їх активують шляхом натискання (такі випадки називаються самодеактивацією);
- навесні, коли відбувається танення снігового покриву або йдуть рясні дощі, ґрунт стає напіврідким, і деякі міни можуть “мігрувати” (переміщуватися на відстань до кількох метрів від місця встановлення).

Своєю чергою, демаскуючі ознаки встановлення мін обумовленні низкою факторів, серед основних (фактори, що присутні майже завжди) можна виділити наступні [2]:

- наявність вибухової речовини та локально розміщеної маси металу (навіть т. зв. “неметалеві” – міни в пластикових корпусах – містять до 0,1 г алюмінію);
- характерна форма;
- неоднорідності шару ґрунту, що покриває міну.

Крім основних, виділяють ще й додаткові демаскуючі фактори, щоправда, вони можуть бути присутні далеко не завжди [5]:

- наявність годинникового механізму чи електронного таймера;
- наявність сейсмічного, магнітного чи оптичного датчика цілі;
- наявність радіоприймача або провідних ліній керування.

Таким чином, міну може бути виявлено за рахунок трьох основних факторів [5]:

- скупчення певної маси конкретної вибухової речовини;
- характерної форми і розмірів;
- порушення однорідності шару ґрунту в місці встановлення.

Очевидно, що при дистанційному виявленні вибухонебезпечних предметів лише певна частина із зазначених факторів буде грати важливу роль. Переважна більшість методів дистанційного виявлення базуються на опромінюванні ділянки поверхні хвилями певної частоти й амплітуди й аналізі хвилі, що відбилася, бо саме вона несе в собі необхідну інформацію (корисний сигнал). Залежно від того, яким саме чином отримується корисний сигнал, виділяють різні методи пошуку вибухових пристроїв, загальну класифікацію яких наведено на рис. 1 [1].

Лазерна Раманівська спектроскопія. В рамках даної статті розглянемо, як саме здійснюється обробка та розпізнавання отриманого сигналу комбінаційного розсіювання для ідентифікації досліджуваного матеріалу. Модуль ідентифікації повинен надавати відповідь на питання: чим є матеріал (він може бути безпечним чи вибухонебезпечним, органічним чи неорганічним)? Цю задачу вирішують за допомогою ймовірнісного припущення щодо типу матеріалу. Послідовність обробки сигналу поділяється на дві основні фази:

- навчання (побудова бібліотеки матеріалів);
- оцінювання (залучення).

Під час фази навчання набір визначених матеріалів слід передати в навчальний модуль для створення бібліотеки матеріалів, а під час фази тестування невідомий матеріал має бути досліджено на предмет безпечності. Архітектуру інформаційної системи, що використовується при спектроскопії, представлено на рис. 2 [2].

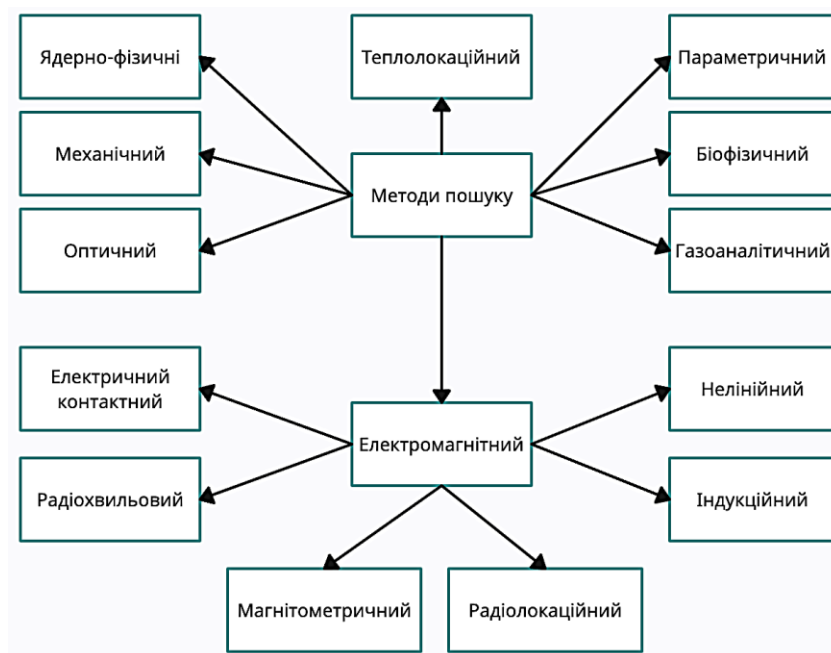


Рис. 1. Класифікація існуючих методів пошуку вибухонебезпечних пристроїв

Після опромінення досліджуваного матеріалу лазерним джерелом, зворотно розсіяний сигнал комбінаційного розсіювання, отриманий установкою, представляється у вигляді відповідних даних, які записуються у спеціальний файл, що автоматично створюється і зберігається в попередньо визначеному місці. Після читання файлу розпочинається процес попереднього кондиціонування, щоб підготувати отриману інформацію до розпізнавання [3]. У свою чергу, він складається із послідовності таких обов'язкових етапів: фільтрації, масштабування та нормалізації.

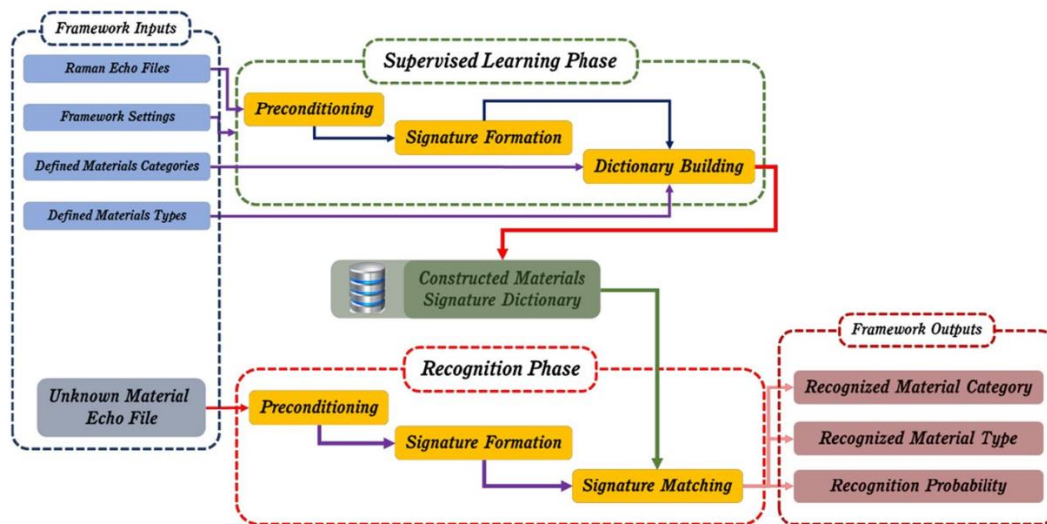


Рис. 2 Архітектура інформаційної системи для використання Раманівської спектроскопії

Фільтрація має на меті покращити співвідношення сигнал/шум шляхом видалення накладеного шуму за допомогою одновимірного Гауссового ядра.

Використання саме цього ядра забезпечує максимізацію швидкості розпізнавання і мінімізацію кількості неоднозначностей. Підпроцеси масштабування та нормалізації спрямовані на приведення до єдиної масштабної шкали для всіх отриманих зворотно розсіяних сигналів комбінаційного розсіювання від різних матеріалів.

Під час фази навчання запропонована структура зберігає отриманий і оброблений сигнал комбінаційного розсіювання у зворотному напрямку та створює еквівалентний сигнатурний матеріал, використовуючи версію оригінального зворотного розсіювання ущільненої форми після видалення спотворень сигналу за допомогою підходу ущільнення, щоб створити бібліотеку підписів матеріалу. Ця бібліотека має бути еталоном для запропонованої структури.

На етапі навчання вирішуються такі підзадачі:

1. Навчання під наглядом. За допомогою навчання під наглядом запропонована структура вивчає категорії та типи матеріалів, які знаходяться під наглядом оператора системи. Оператор передає в систему попередньо визначені дані про матеріал: сигнатуру матеріалу, створену з переданих даних, категорію та тип матеріалу, на основі правил генерації підпису матеріалу, як показано на рис. 3 [4].

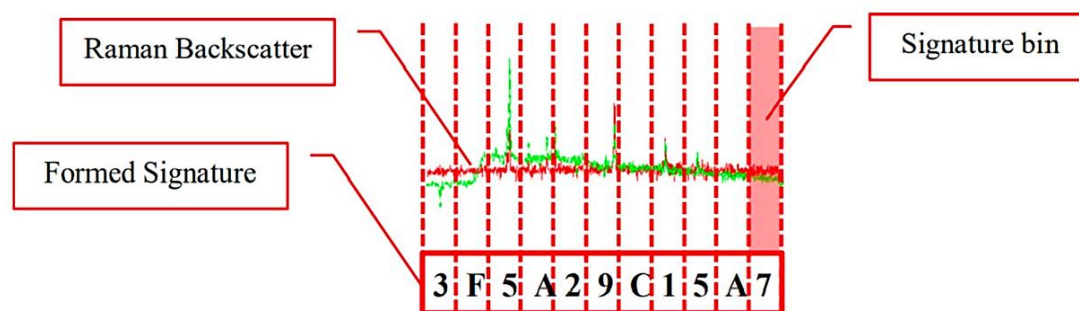


Рис. 3 Ілюстрація формування підпису матеріалу

2. Формування підпису. Унікальна сигнатура матеріалу, сформована шляхом ущільнення отриманого попередньо зумовленого сигналу комбінаційного розсіювання у зворотному напрямку перетворюється у вектор сигнатури постійної ширини, який описує унікальний шаблон матеріалу. Формування сигнатур за допомогою ущільнення може маскувати різні варіанти для того самого матеріалу, що може призвести до помилкового виявлення або розпізнавання. Раманівське зворотне розсіювання, поділене на попередньо визначену кількість ділянок, що дорівнює ширині вектора сигнатури, тоді як кожна ділянка стискає медіанне значення для відповідних рівнів зворотного розсіювання за допомогою схеми алгоритму формування сигнатури [4].

3. Створення бібліотеки. На цьому етапі створюється бібліотека матеріалів шляхом завантаження всіх файлів сигналу комбінаційного розсіювання певного матеріалу в режимі виправлення, системний тренер дає йому назву та категорію. Бібліотека матеріалів збирає всі сигнатури навчених матеріалів у організованій формі, щоб полегшити пошук і зіставлення підписів. Бібліотека організована відповідно до категорії матеріалу та типу матеріалу для виправлень, щоб прискорити підпроцес зіставлення, а її структуру показано нижче на рис. 4 [2].

Фаза залучення. На цьому етапі запропонована структура бере участь у дослідницькому каналі та починає розпізнавати матеріали, які проходять через цей канал. Правильний рівень розпізнавання в основному залежить від кількості навчених матеріалів і кількості записів того самого матеріалу за різних умов і обставин [2]. На етапі залучення вирішуються описані нижче підзадачі.

Співставлення підписів. На цьому кроці виконується процес співставлення між сформованою сигнатурою для досліджуваного матеріалу та навченими сигнатурами, що зберігаються у створеній бібліотеці. Процес узгодження використовує кореляцію Пірсона для досягнення кількісного критерію узгодження [4].

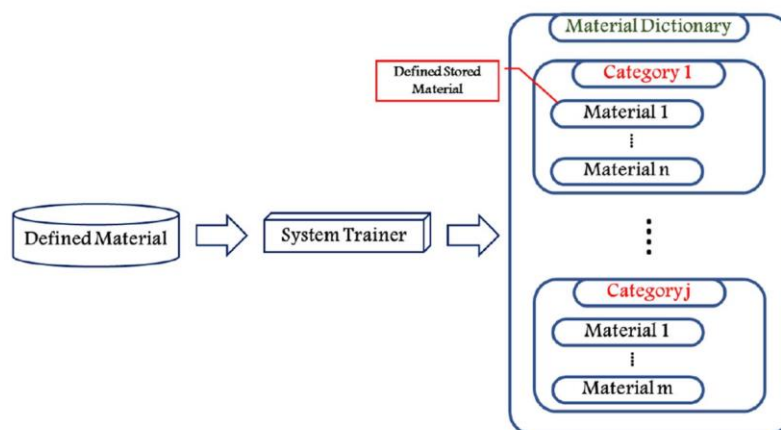


Рис. 4. Структура бібліотеки, створеної на етапі навчання

Автономне регулювання чутливості. Запропонована структура не залежить від ідеальної відповідності між сигнатурою досліджуваного матеріалу та сигнатурами, що зберігаються в бібліотеці. Зіставлення сигнатур може здійснюватися за допомогою попередньо визначеного рівня чутливості або його можна налаштувати на автономне сканування рівня чутливості, доки збережена бібліотечна сигнатура не буде збігатися із досліджуваною сигнатурою на заданому рівні чутливості [2].

Виявлення в реальному часі. Запропонована структура за нормальних умов і відкритого налаштування чутливості виявляє ціль протягом декількох мілісекунд в результаті оптимізації отримання бібліотеки, що можна вважати розпізнаванням у реальному часі. Досягається це за рахунок того, що словник матеріалів (або бібліотека) зберігається за категоріями з мітками та адресами для кожної категорії та типу матеріалу; фаза залучення перетворює весь словник на єдину матрицю для полегшення та прискорення процесу пошуку відповідно до попередньо визначеної чутливості.

Візуальне порівняння сигнатур. Запропонована структура включає візуальне представлення сигнатур досліджуваного матеріалу (крива сигнатур) на додаток до розпізнаних сигнатур можливих матеріалів для підтримки прийняття рішень оператором, як показано на рис. 5 (тут червоним кольором показана крива сигнатури досліджуваного матеріалу, а зеленим – якогось розпізнаного раніше).

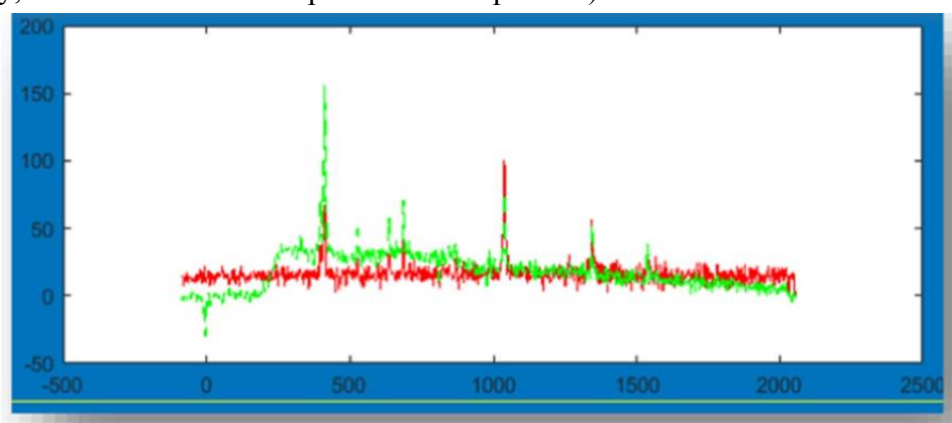


Рис. 5 Візуальне порівняння в реальному часі

Виявлення об'єкта. У разі виявлення небезпечного матеріалу, запропонована структура надсилає попереджувальні сигнали (сирена) та візуальне повідомлення, які попереджають оператора про ймовірну загрозу (а на додаток – ще й імовірний тип та співвідношення імовірностей відповідно до налаштувань чутливості) [3].

Георадар. Моностатичні системи. Моностатичні георадари належать до найпростіших архітектур і використовуються досить рідко. Основна перевага цих систем базується на використанні єдиної антени, що спрощує як компенсацію зв'язків, так і процедуру вимірювань. Послідовність кроків вимірювань на шляху сканування можуть мати будь-яку щільність. Структурну схему сучасного моностатичного георадара наведено на рис. 6 [5].

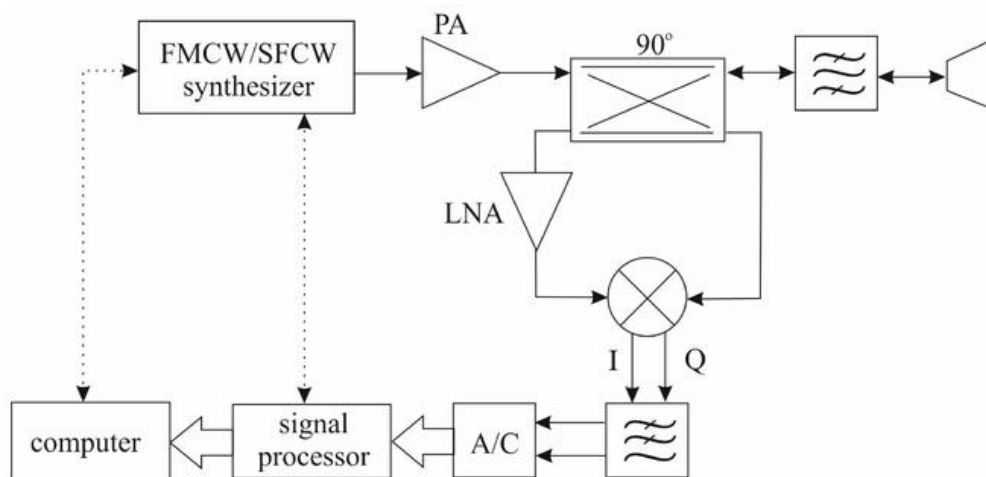


Рис. 6. Структурна схема моностатичного георадара

Сигнал FMCW/SFCW (Frequency-Modulated Continuous Wave/Stepped Frequency Continued Wave) від синтезатора надсилається через направлений зв'язувач до антени, а потім – до шарів ґрунту. Відбитий від цілі сигнал приймається тією ж антеною. Оскільки частота змінюється певним чином, прийнятий сигнал має нижчу частоту, ніж переданий. Різниця між частотами пропорційна часовій затримці від передачі до прийому, а час визначається відстанню від антени до відбивача (цілі) і назад. Ця різниця виділяється за допомогою квадратурного змішувача. Приріст значення частоти в синтезаторах вибирається таким чином, щоб забезпечити незначне частотно залежне зменшення глибини проникнення в кожен ґрунт. Це типовий прийом прямого перетворення. Щоб відійти від нульової різниці частот, часто використовується додаткова лінія затримки. Застосування 90° направленого зв'язувача та квадратурного виявлення спрощує цифрову обробку сигналу [6].

Серйозним недоліком моностатичної системи є подвоєння і кореляція перешкод, а також дуже жорсткі вимоги до якості направленого зв'язувача. Це має істотний вплив на небажані струми витоку між передавачем і приймачем. Витоки зменшують чутливість приймача і, отже, динаміку системи. Для компенсації витоків можна застосувати додатковий з'єднувач і регульований фазообертальний пристрій. Вдосконалену структуру моностатичного георадара зображено на рис. 7 [5].

У цій конфігурації витоки сигналу не заважають один одному за умови, що сигнал від кола зв'язувача, підключеного до синтезатора, точно налаштований відносно посилення та зсуву фази.

Окремою проблемою в системах CWGPR (Continued Wave Ground Penetrating Radar) є складність отримання постійного приросту частоти під час генерації зондуючого сигналу. Комерційні готові генератори (COTS – Commercial off-the-shelf), які зазвичай є джерелом сигналу, мають нелінійність близько 2 %, тоді як очевидне погіршення вихідного сигналу спостерігається вже при відхиленні у 0,1 %. Це погіршення сигналу є відповідальним за помилкове відлуння, що з'являється на радіолокаційних зображеннях.

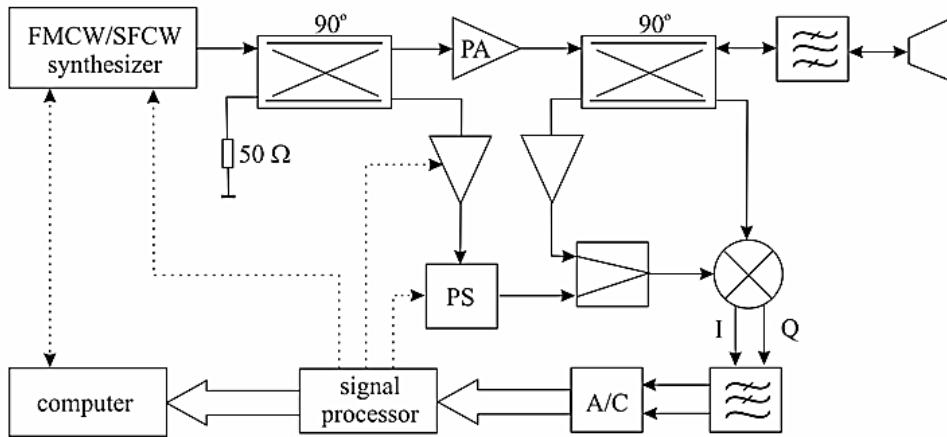


Рис. 7. Структура моностатичного георадара

Георадар. Бістатичні системи. У бістатичних системах тракти передавача і приймача просторово розділені. Це дозволяє уникнути проблеми подвоєння та кореляції перешкод, за рахунок ускладнення геометрії вимірювання. Система може працювати без циркуляційних насосів, перемикачів або направляючих муфт, що дозволяє досягти кращого, порівняно з моностатичними системами, розділення між трактами передавача та приймача та значно збільшити динаміку системи. Крім того, бістатична архітектура георадарної системи полегшує використання кількох приймачів.

Основна відмінність між окремими конструкціями (як моно-, так і бістатичними) виникає через структуру джерела сигналу CW (Continuous Wave). Георадар високої роздільної здатності працює на частотах від 0,4 ГГц до майже 4 ГГц, тоді як осцилятори керування напругою COTS з прийнятно низьким рівнем фазового шуму можуть бути налаштовані в діапазоні 80% від їх центральної частоти. У цьому випадку згадана пропускна здатність недоступна. З цієї причини такі пристрої не можна використовувати в системах високої роздільної здатності. Цю незручність можна вирішити кількома способами. Один із них вимагає застосування VCO (Voltage-Controlled Oscillator) з відносно вузькою смугою та центральною частотою, розташованою набагато вище необхідної. Радарний сигнал генерується в процесі перетворення частоти зі збереженням ширини смуги. Схематичний вигляд рішення представлено на рис. 8 [7].

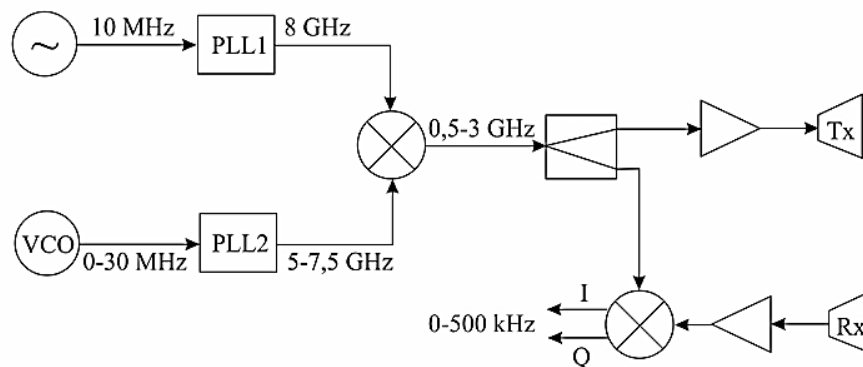


Рис. 8. Структурна схема бістатичної системи з пониженням перетворення смуги

Таке рішення застосовано в системі WISDOM. Фазовий автопідстроювач частоти (PLL1) збільшує частоту кварцевого джерела до значення, розташованого набагато вище центральної частоти системи. PLL2 помножує сигнал від регульованого вузько смугового

джерела та генерує стабільний сигнал зі смугою пропускання 2,5 ГГц і центральною частотою 6,25 ГГц. Сигнали з PLLs змішуються для отримання диференціальних частот від 0,5 ГГц до 3 ГГц. У такому рішенні багато небажаних продуктів змішування розміщуються поза смугою радіолокації. Через низьку частоту джерел їх можна замінити генераторами прямого цифрового синтезу (DDS – Direct Digital Synthesis) [8].

Системи, які використовують DDS для отримання прямої генерації сигналу в надширокій смузі (наприклад, від 1 ГГц до 3 ГГц), все ще належать до експериментальних або лабораторних рішень. Суттєвим недоліком систем прямого синтезу є низька чистота генерованого спектра.

Зразкове рішення, представлене на рис. 8, має деякі серйозні недоліки: вимагає застосування PLL, що має смугу пропускання, рівну призначеній. Його можна обійти за допомогою перетворення частоти та застосування схем подвоєння частоти, як показано на рис. 9.

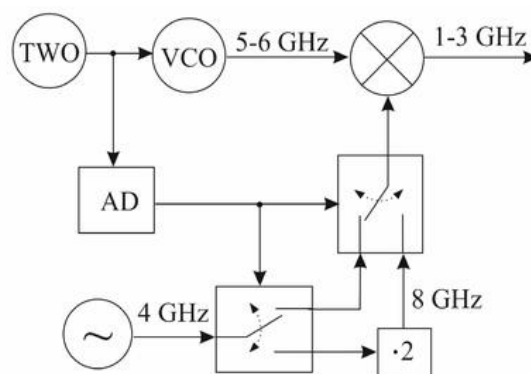


Рис. 9. Генератор надширокопasmового сигналу з перетворенням і подвоєнням частоти

У такій конфігурації згенерований сигнал складається з двох однакових піддіапазонів. Нижній піддіапазон генерується під час збільшення напруги на TWO (Triangular Waveform Oscillator) та відповідної частоти VCO від 5 ГГц до 6 ГГц; верхня підсмуга – при зниженні цих значень. У першому випадку сигнал від VCO змішується з частотою 4 ГГц, а в другому – із частотою 8 ГГц. Перемикання частот починається після виявлення мінімуму або максимуму TWO амплітуд. В результаті вихідний сигнал є сумою двох піддіапазонів: 1-2 ГГц і 2-3 ГГц. Існує багато варіантів поєднання ключів, гетеродинів і VCOs [7].

Пристрої векторних аналізаторів мереж. Коли швидкість сканування та максимальна дальність георадару не важливі та немає потреби у багатоканальних вимірюваннях, для проникнення в ґрунт можна застосувати векторний мережевий аналізатор (VNA – Vectors Network Analyzer) та взаємодіючий комп'ютер із відповідним програмним забезпеченням [9]. VNA дозволяє вимірювати комплексні коефіцієнти передачі та відбиття двопортової мережі у фіксованому діапазоні частот. У георадарних вимірюваннях антенна система та середовище розповсюдження відіграють роль тестового пристрою. Обладнання може працювати як в моно-, так і в бістатичному режимі в залежності від налаштувань вимірювання-розрахунку коефіцієнта відбиття та пропускання відповідно.

Застосування VNA для цієї мети в минулому було виправданим лише для лабораторних експериментів. Доступні ціни на обладнання, зменшення габаритів і збільшення швидкості вимірювання змінили цю ситуацію. Кожен VNA складається з компонентів, типових для георадара, тобто надширокопasmового джерела SFCW, спрямованих зв'язувачів, частотних змішувачів, детекторів і блоку обробки цифрового сигналу. Приклад функціональної схеми наведено на рис. 10 [8].

Сучасні VNA часто мають можливість обчислення зворотного перетворення Фур'є за допомогою вбудованого DSP (Digital Signal Processor), тому отримані вихідні дані представлені у часовій області, що полегшує подальшу обробку даних. Різноманітність варіантів вимірювання робить рішення популярним для багатьох застосувань. Варто зазначити, що ринок електронного обладнання пропонує досить хороші та дешеві VNA для цілей, які не потребують значної швидкості сканування [5, 9].

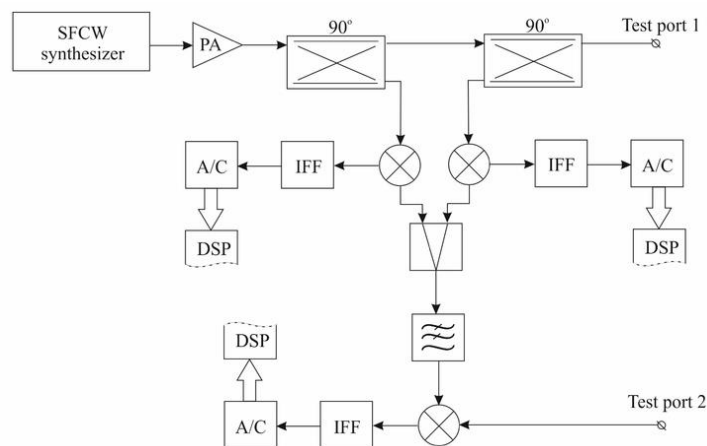


Рис. 10. Функціональна схема VNA

Метод пошуку вибухонебезпечних речовин за допомогою терагерцового сигналу. Терагерцова спектроскопія в часовій області (THz-TDS – TeraHertz Time-Domain Spectroscopy) має велике значення для хімії, матеріалознавства та медицини.

Спектральний діапазон від 0,1 ТГц до 10 ТГц (довжина хвилі від 3,3 см до 0,33 см відповідно) є важливою областю для низькочастотної діелектричної релаксації та коливальної спектроскопії рідин, таких як вода, метанол, етанол, пропанол та ін. Це також було особливо важливо для вивчення низькочастотних мод у молекулярних кристалах. THz-TDS у поєднанні із теорією функціонала густини можна використовувати для вивчення амінокислот, пептидів, ліків і вибухових речовин. Останні два особливо цікаві завдяки здатності терагерцового випромінювання проникати крізь одяг і упаковку. Існують також програми, в яких THz-TDS оптимізовано для виявлення бомб, наркотичних засобів і зброї [10].

У галузі матеріалознавства THz-TDS ідеально підходить для вимірювання мобільних носіїв заряду, оскільки вони відбивають і поглинають THz-випромінювання. THz-TDS використовувався для вимірювання електропровідності, топологічних ізоляторів і надпровідників, а також фазових переходів у цих матеріалах. Довжина хвилі становить близько 300 мкм, тому цілі критерію субхвилі легко досягаються за допомогою сучасних літографічних методів. Крім того, відсутність класичних оптичних компонентів у цьому частотному діапазоні викликала дослідження в царині ТГц метаматеріалів. Фільтри на основі мета матеріалів (статичні та динамічні), лінзи, направляючі промені та ідеальні поглиначі були охарактеризовані за допомогою THz-TDS. Яскраве різноманіття застосувань призвело до появи великої кількості різних конфігурацій ТГц-спектрометрів.

Спектроскопія стосується енергії, довжини хвилі або частоти фотонів, які проходять через зразок. У випадку THz-TDS сигнал у часовій області безпосередньо вимірює перерідне електричне поле, а не його інтенсивність [11].

Напруженість електричного поля на детекторі зазвичай становить 10-100 В/см і має тривалість у кілька пікосекунд. Тому потрібен швидкий і чутливий метод виявлення електричного поля. Прямі електричні детектори та схеми, зазвичай, мають час наростання та спаду в діапазоні від піко- до наносекунд, і тому вони не мають достатньо високої роздільної здатності за часом. Спосіб досягнення субпікосекундної роздільної здатності

полягає у використанні оптичних методів, у яких ультракороткий оптичний імпульс ближнього інфрачервоного випромінювання (зазвичай коротший за 100 фс) розділяє промінь уздовж двох шляхів для генерації та виявлення залежного від часу ТГц поля [11].

Вимірювання в часовій області базується на вибірці невідомого ТГц поля за допомогою відомого фемтосекундного лазерного імпульсу, який називається імпульсом зчитування. THz-TDS використовує згортку короткого імпульсу зчитування з довшим імпульсом THz. Для виконання цієї згортки можна використовувати кілька різних методів. Усі ці детектори мають дві спільні риси: вони вимірюють ТГц поле, а не інтенсивність, і сигнал виходить лише тоді, коли оптичний імпульс зчитування надходить одночасно з ТГц імпульсом.

Той факт, що детектор є чутливим лише тоді, коли обидва імпульси надходять одночасно, і що оптичний імпульс значно коротший за ТГц імпульс, дозволяє вимірювати ТГц поле як функцію часу. Крім того, детектор чутливий до знаку електричного поля. Тобто ми вимірюємо залежну від часу амплітуду $E(t)$, на відміну від інших методів, таких як FTIR (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy), які вимірюють лише інтенсивність ($E^2(t)$) електромагнітного сигналу і, отже, не фіксують інформації про фазу [13].

Вимірний сигнал відповідає амплітуді ТГц поля в один момент часу (t_1). Наступним кроком є вимірювання сигналу в усі моменти часу. Це досягається шляхом затримки імпульсу зчитування відносно ТГц імпульсу за допомогою механічної лінії затримки. Вихід лазера розбивається на два промені: один із променів використовується для генерації ТГц випромінювання, а інший є променем зчитування, який його виявляє. Часова затримка досягається збільшенням довжини шляху одного з пучків. Час проходження лазерного імпульсу становить 30 см/нс, або 300 мкм/пс, що вирішує проблему фемтосекундної часової роздільної здатності до мікрометрової просторової роздільної здатності. Точне мікропозиціонування досягається за допомогою етапів позиціонування, керованих комп'ютером. У THz-TDS (і надшвидкої спектроскопії в цілому) ці етапи зазвичай називаються лініями затримки. Час затримки в обидві сторони змінюється на 6,6 фс для кожного мікрона зміщення лінії затримки. Швидкість руху лінії затримки визначає швидкість дискретизації в часовій області. Тому прийнято вказувати швидкість лінії затримки в пс/с [12].

Водяна пара має сильні характеристики поглинання в діапазоні ТГц, що може заважати вимірюванням. Щоб мінімізувати це поглинання, траєкторія ТГц променя поміщається в камеру продувки (як показано на рис. 11), яка продувається сухим повітрям або азотом. Крім того, корпус також можна завакуумувати, але це вимагає значно кращого рівня проектування.

Система, зображена на рис. 11, використовує геометрію передачі THz-TDS, яка є найпростішою, але також можна вимірювати ТГц імпульс, відбитий від зразка, або використовувати геометрію ослабленого повного відбиття. Крім того, THz-TDS також можна використовувати для виявлення зразка в ближньому полі [10].

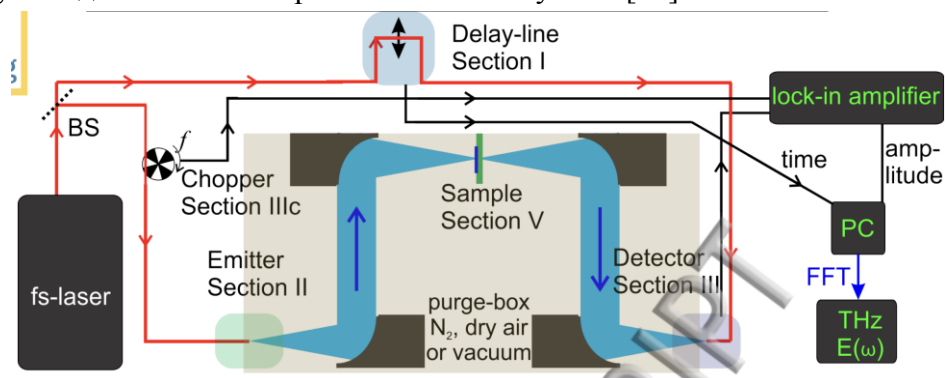


Рис. 11. Спрощений THz-спектрометр у часовій області (THz-TDS)

Висновки. У цій статті було досліджено лише невелику частину методів виявлення вибухонебезпечних речовин серед усіх існуючих, які, на думку авторів, є найперспективнішими для вирішення задач гуманітарного розмінування в умовах повномасштабної війни нашої країни. Для кожного із методів наведено результати експериментального застосування, а також визначено переваги і недоліки, зокрема:

– Раманівська спектроскопія вимагає досить складного і дороговартісного обладнання, яке дозволить точно зафіксувати спектри вибухонебезпечних речовин, її результати дозволяють виявляти такі речовини у великих обсягах, щоправда, тільки у незмаскованому вигляді;

– георадар дозволяє виявляти вибухівку у прихованому вигляді, оскільки його випромінювання може проникати крізь різні поверхні і матеріали, цей метод є відносно більш дешевим і не вимагає надскладного обладнання;

– застосування терагерцового сигналу також вимагає складного і дороговартісного обладнання, але дає можливість виявляти вибухові речовини у дуже малих обсягах.

Із зазначеного можна зробити висновок, що застосування георадара є найбільш прийнятним методом виявлення вибухових предметів для гуманітарного розмінування.

Список використаних джерел

1. Amazeen, C. A. Developmental status of the U.S. Army's new handheld standoff mine detection system (HSTAMIDS) / C. A. Amazeen, M. C. Locke // Proceedings of the 2nd International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines. – 1998. – № 458. – Pp. 193-197.
2. Ayoub, H. S., Mokhtar, A. M., El-Sherif, A. F., Elbashar, Y. H.: Modified range equation for exact modeling and design optimization of active laser remote sensing systems / H. S. Ayoub, A. M. Mokhtar, A. F. El-Sherif, Y. H. Elbashar // Opt. Quantum Electronics. – 2021. – № 35(110). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02759-5>.
3. Raman spectroscopy applications in forensic science / S. R. Khandasamy, M. A. Fikiet, E. Mistek, Y. Ahmed, L. Halámková, J. Bueno, I. K. Lednev // Forensic Chem. – 2018. – № 8. – Pp. 111-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.002>.
4. Advances in explosives analysis—part II: photon and neutron methods / K. E. Brown, M. T. Greenfield, S. D. McGrane, D. S. Moore // Anal. Bioanal Chem. – 2016. – № 408(1). – C. 49-65. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9043-1>.
5. Stec, B. Theory and measurement of signal-to-noise ratio in continuous-wave noise radar / B. Stec, W. Susek // Sensors. – 2018. – №18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18051445>.
6. Zastosowanie radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie / W. Susek, B. Stec, M. Kniola, M. Czyzewsk // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. – № 1(4). – Pp. 173-177. DOI: 10.15199/48.2018.04.39.
7. A novel monostatic concurrent multiband radar front-end architecture and its dual-band implementation,” AEU / M. Li, Y. Wu, L. Jiao, Y. Liu // International Journal of Electronics and Communications. – 2018. – № 89. DOI: 10.1016/j.aeue.2018.03.030.
8. Monostatic continuous-wave radar integrating a tunable wideband leakage canceler for indoor tagless localization / M. Mercuri, P. Barmuta, P. J. Soh, P. Leroux, D. M.-P. Schreurs // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2017. – № 9(8). – Pp. 1-8. DOI: 10.1017/S1759078717000551.
9. Pieraccini, M. No-contact GPR for investigating painted walls / M. Pieraccini, L. Miccinesi / 17th International Conference on Ground Penetrating Radar. – 2018. DOI: 10.1109/ICGPR.2018.8441580.
10. Security applications of terahertz technology / M. C. Kemp, P. F. Taday, B. E. Cole, J. A. Cluff, A. J. Fitzgerald, W. R. Tribe // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 5070. DOI: 10.1117/12.500491
11. Spectroscopic characterization of explosives in the far infrared region / Y. Chen, H. Liu, Y. Deng, D. Veksler, M. Shur, X. -C. Zhang, D. Schauki, M. J. Fitch and R. Osiander // Terahertz for Military and Security Applications II / R. J. Hwu, D. L. Woolard, eds. – Proc. SPIE 5411, 2004. – Pp. 1-8.

12. Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy / K. Yamamoto, M. Yamaguchi, F. Miyamaru, M. Tani, M. Hangyo, T. Ikeda, A. Matsushita, K. Koide, M. Tatsuno, Y. Minami // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2004. – № 43. – Pp. 414-417.

13. Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy / F. Huang, B. Schulkin, H. Altan, J. F. Federici, D. Gary, R. Barat, D. Zimdars, M. Chen, D. B. Tanner // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – № 85. – Pp. 5535-5537.

References

1. Amazeen and Locke, M. C. (1998). Developmental status of the U.S. Army's new handheld standoff mine detection system (HSTAMIDS). *Proceedings of the 2nd International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines*, 458, 193–197.

2. Ayoub, H. S., Mokhtar, A. M., El-Sherif, A. F., Elbashar, Y. H. (2021). Modified range equation for exact modeling and design optimization of active laser remote sensing systems. *Opt. Quantum Electronics*, 35(110). <https://doi.org/10.1007/s11082-021-02759-5>.

3. Khandasammy, S.R., Fikiet, M.A., Mistek, E., Ahmed, Y., Halámková, L., Bueno, J., Lednev, I.K. (2018). Raman spectroscopy applications in forensic science. *Forensic Chem.*, 8, 111–133. <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.002>.

4. Brown, K.E., Greenfield, M.T., McGrane, S.D., Moore, D.S. (2016). Advances in explosives analysis—part II: photon and neutron methods. *Anal. Bioanal. Chem.*, 408(1), 49–65. <https://doi.org/10.1007/s00216-015-9043-1>.

5. Stec, B., Susek, W. (2018). Theory and measurement of signal-to-noise ratio in continuous-wave noise radar. *Sensors*, 18. <https://doi.org/10.3390/s18051445>.

6. Susek, W., Stec, B., Kniola, M., Czyzewski, M. (2018). Zastosowanie radaru szumowego do wykrywania obiektów ukrytych w gruncie. *Przegląd Elektrotechniczny*, 94(4).

7. Li, M., Wu, Y., Jiao, L., Liu, Y. (2018). A novel monostatic concurrent multiband radar front-end architecture and its dual-band implementation. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.03.030>.

8. Mercuri, M., Barmuta, P., Soh, P. J., Leroux, P., Schreurs, D. M.-P. (2017). Monostatic continuous-wave radar integrating a tunable wideband leakage canceler for indoor tagless localization. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(8). <https://doi.org/10.1017/S1759078717000551>.

9. Pieraccini, M., Miccinesi, L. (2018). No-contact GPR for investigating painted walls. *17th International Conference on Ground Penetrating Radar*. <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441580>.

10. Kemp, M. C., Taday, P. F., Cole, B. E., Cluff, J. A., Fitzgerald, A. J. and Tribe, W. R. (2003). Security applications of terahertz technology. *Terahertz for Military and Security Applications*. Proc. SPIE 5070, 44-52.

11. Chen Y., Liu H., Deng Y., Veksler D., Shur M., Zhang X.-C., Schauki D., Fitch M. J. and Osiander, R. (2004). Spectroscopic characterization of explosives in the far infrared region. *Terahertz for Military and Security Applications II*, Proc. SPIE 5411, 1-8.

12. Yamamoto, K., Yamaguchi, M., Miyamaru, F., Tani, M., Hangyo, M., Ikeda, T., Matsushita, A., Koide K., Tatsuno, M. and Minami, Y. (2004). Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy. *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, 414-417.

13. Huang F., Schulkin B., Altan H., Federici J. F., Gary D., Barat R., Zimdars D., Chen M. and Tanner, D. B. (2004). Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.*, 85, 5535-5537.

Отримано 18.03.2024

Artem Syguta¹, Oleksii Krasnozhan²

¹PhD student of the Department of Information and Computer Systems, group ASD-122-22
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: syguta@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-8328-1277>

²PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: wingcommander2011@gmail.com, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2500-254X>, **ResearcherID:** G-4623-2014

RESEARCH OF METHODS OF SEARCHING FOR EXPLOSIVE OBJECTS

The study of methods of searching for explosive objects is an important problem, as it allows to determine the effectiveness of the application of each of the existing methods, which is extremely important for the safety of civilians who are in war conditions, and also allows to prevent possible terrorist acts. This article examines three main methods: laser Raman spectroscopy, ground-penetrating radar, and the terahertz search method.

Laser Raman spectroscopy is one of the rather promising methods for the study of explosive objects. It is based on the analysis of the spectrum of light scattered after illumination with a laser beam. Each substance has its own characteristic scattered spectra that can be used for its identification. Laser Raman spectroscopy is highly specific and sensitive to the chemical composition of materials, including explosive substances. It can be applied for non-invasive and rapid detection of such substances, even if they are present in large volumes.

GPR is another method for finding explosive objects. It uses radio wave radiation to measure the properties of materials and can detect changes caused by the presence of explosive substances. Ground-penetrating radar has high resolution and the ability to penetrate through different layers of materials, which makes it effective in detecting hidden objects.

The use of a terahertz signal is also a promising method in the search for explosive substances. It is based on the use of radiation in the terahertz frequency range, which is between the microwave and infrared ranges. This method is characterized by high sensitivity to chemical changes in materials and the ability to detect even very low concentrations of substances. The use of data processing algorithms and artificial intelligence contributes to the development of effective systems for detecting explosive materials.

A summary analysis of the latest research and publications indicates the effectiveness and perspective of the methods of terahertz technology, ground-penetrating radar and laser Raman spectroscopy in the detection of explosive objects. These methods are characterized by high sensitivity, specificity and the ability to work in real time. Additional research and development of these techniques can contribute to further improvements in security systems by effectively detecting and removing explosive objects to prevent potential hazards.

Key words: mines, explosive objects; search methods; georadar; Raman spectroscopy; terahertz technology.

Figures: 11. *References:* 13.