

УДК 681

Казурова А.Є.¹, Скнар К.П.²

¹канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

²асп. НУ «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ГЛИБИННОГО ЗОНДУВАННЯ ТА ПОШУКУ ПІДЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

Повномасштабне вторгнення російської федерації в Україну призвело до значних руйнувань та численних людських втрат. Одним із серйозних наслідків є забруднення територій нерозірваними боеприпасами, зокрема авіабомбами (НРАБ), які через конструктивні особливості можуть залишатись активними тривалий час після застосування. НРАБ становлять небезпеку для цивільного населення, гуманітарних місій, військових, а також ускладнюють відновлення прифронтових та деокупованих територій.

Особливу небезпеку становить проникнення бомб глибоко в ґрунт, що ускладнює їх виявлення. Крім того, з часом відбувається витік токсичних речовин (тротил, гексоген) [1], які потрапляють до ґрунту та підземних вод, що викликає екологічні проблеми.

Ключовим є точне виявлення та ідентифікація вибухонебезпечних предметів. Виявлення НРАБ є складним завданням через кілька факторів: відсутність точних даних; глибина проникнення; різноманітність матеріалів; зміни в ландшафті; небезпека детонації. Для вирішення цієї задачі, а також забезпечення швидкості збору даних, масштабованості та всюдихідності використовуються малі безпілотні літальні апарати (БПЛА) [2-4] у поєднанні з електромагнітними засобами дистанційного зондування Землі, зокрема:

георадарні системи – прилади, що випромінюють високочастотні імпульси в ґрунт і реєструють відбиті сигнали від підповерхневих структур;

магнітометри – прилади для вимірювання змін магнітного поля, що сигналізують про наявність феромагнітних об'єктів.

Окрім традиційних методів, перспективними є системи на основі SAR (Synthetic Aperture Radar) та InSAR (Interferometric SAR) [5] у різних діапазонах електромагнітного спектру. SAR – це активний метод дистанційного зондування, що використовує радіохвилі для створення детальних зображень земної поверхні незалежно від часу доби та погодних умов. InSAR є технологією, що використовує два або більше SAR-зображень, отриманих з однієї і тієї ж області в різний час, для виявлення змін на поверхні Землі (деформація ґрунту, зсуви тощо) шляхом аналізу різниці фаз між цими зображеннями. Впровадження систем на базі InSAR є перспективним напрямком дослідження цієї теми. Використання SAR/InSAR із БПЛА обмежене розмірами та енергоспоживанням. Ефективне рішення – розподіл електроніки компактними модулями.

Попередньо структуру електроніки можна поділити на 4 модулів:

- модуль живлення та розподілу тактової частоти;
- модуль передавача, який генерує лінійно-частотно-модульований сигнал з налаштуванням часом розгортки, частотою повторення імпульсів і вихідною потужністю, що забезпечує гнучкість конфігурації системи;
- модуль приймача, який спочатку підсилює сигнал, що надходить від приймальних антен, а потім здійснює стискання імпульсу;
- модуль збору даних системи, що складається з програмованої вентиляційної матриці (FPGA), комп'ютера на базі Linux, твердотілого накопичувача (SSD). Модуль конфігурує радіочастотні компоненти, контролює передану потужність і температуру, налаштовує навігаційну систему та керує збором радіолокаційних даних, які вибираються та зберігаються на SSD.

Така структура дозволяє виконати її на друкованих платах, а не як окремі елементи. Як результат, цей підхід дає перевагу у зменшенні об'єму та ваги. Сигнали обробляються алгоритмами цифрової фільтрації,

геоприв'язуються та калібруються. Для ідентифікації НРАБ застосовуються методи машинного навчання, що навчаються на заздалегідь розмічених наборах даних. Це дозволяє автоматизувати пошук та підвищити точність виявлення об'єктів.

Таким чином, поєднання БПЛА та сучасних методів електромагнітного зондування відкриває нові можливості у виявленні вибухонебезпечних предметів на деокупованих територіях України. Крім того, цей підхід може використовуватись для пошуку й інших підземних об'єктів, таких як тунелі, приховані споруди та геологічні аномалії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Evans R. Explosive Ordnance Guide for Ukraine : 2nd edition / R. Evans, B. Seddon // Switzerland : GICHD. – 2022. – 224 pp.
2. Ментус І. Е. Методи виявлення мін для гуманітарного розмінування: огляд / І. Е. Ментус, В. А. Ясько, Є. Ю. Саприкін // Український журнал дистанційного зондування Землі. – 11(3). – 2024. – С. 22–28.
3. Гуцул Т. Класифікація та особливості методів гуманітарного розмінування територій на сучасному етапі : монографія / Т. Гуцул, В. Ткач, М. Хобзей // Чернівецький нац. унів. ім. Ю. Федьковича. – Чернівці, 2024. – 242 с.
4. Poliachenko I. Exploratory study of potential applications of UAV magnetic surveys for unexploded ordnance detection in coastline zone / I. Poliachenko, V. Kozak et al. // *Geofizicheskiy Zhurnal*. – 47(1). – 2025.
5. Ruiz G. Ku-Band SAR-Drone System and Methodology for Repeat-Pass Interferometry / G. Ruiz-Carregal, M. Lort Cuenca, L. Yam et al. // *MPDI. – Remote Sensing*, 16(21). – 2024. – 4069.