

Молочко С.М., Башинський В.Г., Каламурза О.Г., Журахов В.А. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки Збройних Сил України

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ХАРАКТЕРИСТИК ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ДАТЧИКІВ ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ, ВСТАНОВЛЕНИХ НА БпАК

Останніми роками міжнародне співтовариство все глибше усвідомлює масштаби і гостроту проблем, породжуваних наземними мінами та вибухонебезпечними залишками війни, зокрема боєприпасами, що не вибухнули, поступово погоджуючись з тим, що йдеться про глобальну проблему, яка потребує узгоджених заходів у відповідь на міжнародному рівні.

Значне перевищення темпів розвитку та інтенсивності застосування мінної зброї у порівнянні із засобами розмінування, обумовлюють актуальність проблемного питання щодо забезпечення потрібного рівня їх технічної досконалості. При цьому особлива увага повинна звертатися на забезпечення високої якості процесів розмінування, зменшення до мінімального рівня вибухонебезпечних загроз та зниження вартості робіт з розмінування. У сучасних економічних умовах велике значення має високий показник ефективності виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) на визначеній території при відносно мінімальних затратах матеріальних та людських ресурсів.

У статті проаналізовано можливість виявлення вибухонебезпечних предметів за допомогою тепловізора, гіперспектральної камери, магнітометра, металодетектора (датчики виявлення ВНП), котрі встановлені на безпілотний авіаційний комплекс. Крім того, розглянуті властивості датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, що забезпечать їх повноцінне застосування під час гуманітарного розмінування, та проведено розрахунок ефективності дії по пошуку і виявленню вибухонебезпечних предметів із застосуванням безпілотного авіаційного комплексу.

***Ключові слова:** вибухонебезпечні предмети, тепловізор, гіперспектральна камера, магнітометр, металодетектор*

Постановка проблеми. З початком військових дій на сході України постало питання щодо розмінування постраждалих територій. Наразі розв'язанням даної проблеми займаються вітчизняні фахівці та вчені, а також залучаються закордонні фахівці з виявлення та знешкодження ВНП. Методи виявлення ВНП, котрі застосовуються в Україні на даний час, є малоефективними з огляду на масштаб замінованих територій. Отже, необхідна розробка більш ефективних методів виявлення і знешкодження ВНП на основі сучасних досягнень технічного прогресу.

Аналіз останніх досліджень. На теперішній час зарубіжні країни розробили та використовують сучасні мобільні робототехнічні комплекси (РТК) для розмінування і продовжують фінансувати роботи з розширення функціональних можливостей для їхнього застосування у нових напрямках завдяки створенню нових конструктивних схем або використанню уніфікованих підсистем міжтипового призначення [1]. Одним з актуальних у світі напрямів розроблення РТК, у зв'язку з розвитком різноманітних БпЛА, стала активізація ідей щодо застосування БпЛА для ведення розвідки мінної обстановки, виявлення мін і дистанційного їх знищення [1].

За допомогою БпЛА є можливим значне прискорення процесу розмінування, особливо на тих територіях, де міни встановлені та знаходяться досить тривалий час. Так, наприклад, інженери Брістольського університету (Велика Британія) розробили БпЛА, що продемонстрував можливість вести розвідку мінної обстановки та виявляти різні види протипіхотних мін. Безпілотник, за відповідним способом його застосування, здатний знаходити замасковані та старі міни, що знаходяться під товстим шаром ґрунту. Спеціальні сенсори визначають місця викиду дрібних часток вибухової речовини, які з часом

просочуються назовні. На основі координат, де зафіксована їх максимальна концентрація, за допомогою даних БпЛА складається карта розташування мін [1].

Інший приклад. Команда вчених Нью-Йоркського університету Бінгемтона (США) під керівництвом професорів А. Нікуліна і Т. Смета використала інфрачервоні камери, що були встановлені на недорозі БпЛА для виявлення за температурним балансом протипіхотних фугасних мін натискної дії ПФМ-1, що залишилися не розірваними. Вчені встановили, що міни нагріваються набагато швидше оточуючого каміння і тому інфрачервоні камери можуть виявляти місцезнаходження мін з високою точністю. Тепер вчені мають вдосконалити цю технологію і створити повністю автономну систему. Після виявлення міни знищуватимуться за допомогою безпілотників Mine SpectroDrone або Kafon Drone [1].

Актуальність дослідження. Складність глобальної проблеми розмінування як світової потребує інноваційних підходів до її розв'язання. Одним з таких підходів вважається розробка ефективних робототехнічних комплексів на базі безпілотних літальних апаратів, різноманітність яких у світі активно зростає та які, за своїми технічними і тактико-технічними характеристиками, можуть бути застосовані для ведення розвідки мінної обстановки, виявлення ВНП і дистанційного їх знищення [1].

Мета статті. Обґрунтування рекомендації щодо застосування датчиків виявлення ВНП, встановлених на безпілотний авіаційний комплекс, в ході виконання завдань гуманітарного розмінування, а саме:

- тепловізора;
- гіперспектральної камери;
- магнітометра;
- металодетектора.

Виклад основного матеріалу. Для виявлення ВНП переважно використовують фізичні методи: активне електромагнітне зондування поверхневого шару ґрунту електромагнітними імпульсами та синусоїдальними полями (металодетектори 20 кГц – 50 кГц, георадар 100 МГц – 900 МГц), сейсмічною хвилею і нейтронним випромінюванням, реєстрація аномалій електропровідності та щільності ґрунту, вимірювання інфрачервоного та гравітаційного полів та інше [2].

Датчики виявлення ВНП, встановлені на БпАК, повинні володіти властивостями, які забезпечать їх повноцінне застосування під час гуманітарного розмінування. До таких властивостей можна віднести [3]:

- продуктивність – це властивість, що характеризує спроможність датчиків пошуку та виявлення ВНП виконувати заданий обсяг робіт за одиницю часу у визначених умовах. Розрізняють продуктивність конструктивну, технічну та експлуатаційну;
- транспортабельність – властивість, що характеризує пристосованість датчиків пошуку та виявлення ВНП до перевезення різними видами транспорту;
- живучість – властивість, яка характеризує здатність датчиків пошуку та виявлення ВНП виконувати установлений обсяг функцій в умовах впливу різних факторів зовнішнього середовища;
- надійність – властивість датчиків пошуку та виявлення ВНП зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують спроможність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання та транспортування;
- безвідмовність – властивість датчиків пошуку та виявлення ВНП зберігати працездатний стан в термін деякого (заданого) часу або деякого напрацювання (тривалості роботи);
- довговічність – властивість датчиків пошуку та виявлення ВНП зберігати працездатний стан до настання граничного стану (працездатності) при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту;

– ремонтпридатність – властивість датчиків пошуку та виявлення ВВП, яка полягає в пристосованості до попередження і виявлення причин виникнення відмов (повної або часткової втрати працездатності), пошкодження та підтримання і відновлення працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування та ремонту;

– збережуваність – властивість датчиків пошуку та виявлення ВВП зберігати значення показників безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності впродовж роботи та після зберігання або транспортування;

– економічність – властивість, яка характеризує датчики пошуку та виявлення ВВП щодо величини затрат на їх закупку, використання та зберігання. Найбільш загальним параметром економічності датчиків пошуку та виявлення ВВП є питома собівартість одиниці роботи, що виконується БпАК із застосуванням конкретного датчика, за своїм основним призначенням як у ході бойових операцій, так і під час гуманітарного розмінування.

Крім того, датчики пошуку та виявлення ВВП, встановлені на БпАК, повинні мати свою навігаційну систему або бути сполучені з бортовою навігаційною системою, що забезпечить прив'язку інформації з датчиків до місцевості. Повинна бути забезпечена можливість визначення координат будь-якого об'єкту після посадки БпЛА та обробки інформації з датчиків. Використання датчиків повинно здійснюватися у горизонтальному польоті БпЛА з можливістю їх застосування при розворотах у горизонтальній площині. Політ БпЛА з датчиками на пошук та виявлення ВВП повинен виконуватися в режимі автономного польоту за програмою згідно із польотним завданням. Отримана інформація повинна накопичуватися у апаратурі запису та зберігання інформації датчиків [4].

У сучасних економічних умовах велике значення має високий показник ефективності виявлення ВВП на визначеній території при відносно мінімальних затратах матеріальних та людських ресурсів. Для розрахунку ефективності дій БпАК з пошуку і виявлення ВВП може бути використана вартість знімання інформації з одиниці площі земної поверхні [5]:

$$C_{zi} = \frac{C_{In}}{P_{nz} \cdot F_s}, \quad (1)$$

де C_{In} – вартість виконання польотного завдання;

P_{nz} – ймовірність виконання польотного завдання;

F_s – сумарна площа земної поверхні, що переглядається в одному вильоті.

Цей показник дозволяє оцінити ефективність застосування БпЛА для пошуку і виявлення ВВП з урахуванням його виживання, витратності і продуктивності застосованих датчиків виявлення ВВП.

Вартість виконання польотного завдання становить [5]:

$$C_{In} = \frac{C_{ла}}{n_{np}} + C_{\partial} + C_{вм}, \quad (2)$$

де $C_{ла}$ – вартість нового БпЛА;

n_{np} – розрахункова кількість застосування БпЛА;

C_{∂} – вартість датчика виявлення ВВП;

$C_{вм}$ – вартість витратних матеріалів.

Ймовірність виконання польотного завдання представимо як:

$$P_{nz} = K_2 + P_{внп}, \quad (3)$$

де K_2 – коефіцієнт готовності БпЛА;

$P_{внп}$ – ймовірність попадання вибухонебезпечного предмету в поле огляду апаратури БпЛА.

Коефіцієнт готовності БпЛА K_2 характеризує його можливість виконати поставлене завдання, тобто відображає його технічний стан [5]:

$$K_2 = \frac{T_p}{T_c}, \quad (4)$$

де T_p – час безпосереднього функціонування;

T_c – загальний час експлуатації.

Ймовірність попадання вибухонебезпечного предмету в поле огляду апаратури БпЛА $P_{внп}$ виражається як:

$$P_{внп} = \frac{S_{огл}}{S_n}, \quad (5)$$

де $S_{огл}$ – площа огляду датчиком виявлення ВВП, встановленим на БпЛА, в одному вильоті;

S_n – повна площа земної поверхні, на якій виконується польотне завдання з виявлення ВВП.

Розглянемо можливість виявлення ВВП за допомогою тепловізора, гіперспектральної камери, магнітометру та металодетектору, що встановлені на БпЛА.

Тепловізор – оптико-електронний прилад для візуалізації температурного поля та вимірювання температури. Переважно працює в інфрачервоній частині електромагнітного спектру. Принцип дії тепловізора базується на перетворенні випромінення інфрачервоного спектру в видимий діапазон світлового випромінення. Спектральний діапазон, в якому працюють тепловізори, визначається інтервалами довжин хвиль в області максимуму енергії випромінення об'єктів спостереження у відповідних параметрах прозорості атмосфери. Зазвичай, це інтервали довжин хвиль від 3,5 мкм до 5,5 мкм або від 8 мкм до 13,5 мкм. Сучасні тепловізори дозволяють виявляти об'єкти, які мають температурні контрасти до десятків і навіть до сотих частин градусів, і формують зображення високої якості [6].

Основними технічними параметрами тепловізорів є:

- діапазон вимірюваних температур;
- роздільна здатність по температурі (різниця температур, еквівалентна шуму);
- поле зору;
- миттєве поле зору (просторова роздільна здатність);
- робочий спектральний діапазон;
- кількість елементів у приймачі випромінювання [6].

Тепловізор, встановлений на БпЛА мультироторного типу (MrT), перетворює його у потужний інструмент, який може застосовуватися для виявлення ВВП [7].

ІЧ-термографія – це метод перетворення інфрачервоного зображення в радіометричне, що дозволяє зчитувати значення температури із зображення. Більшість тепловізорів видає відеосигнал, в якому білі області показують максимальну випромінювану енергію, а чорні області – більш низьке випромінення. Сіре зображення містить максимальну кількість інформації. Щоб прочитати точні температури, необхідно прийняти до уваги випромінювальну здатність – ефективність, при якій об'єкт випромінює інфрачервоне випромінення [7]. Вона залежить від якостей матеріалу або об'єкта. Це міра ефективності поверхні, що випромінює теплову енергію відносно ідеального джерела – чорного тіла. Випромінювальна здатність залежить від морфології поверхні, шорсткості, окислення, спектральної довжини хвилі, температури і кута огляду. На якість роботи тепловізора впливає відбивна здатність – міра здатності поверхні відбивати випромінення. Камера, що знаходиться поблизу поверхні, сприймає як тепло, отримане від поверхні, так і відбиту фонову температуру навколишнього середовища [7]. Складно проводити вимірювання температури відбиваючої поверхні тому, що на зображення впливають фонові теплові відображення. Слід також потурбуватись про те, щоб не проводити вимірювання під досить похилими кутами, оскільки відбивна здатність погіршується в залежності від кута огляду.

В останні два десятиліття швидко розвивається техніка дистанційного дослідження об'єктів, що використовує методи оптичного спектрального аналізу та розпізнавання

зображень (Spectral Imaging, SI) [8]. За допомогою даних методів у зображеннях досліджуваної поверхні, у вибраному вузькому спектральному діапазоні, вдається спостерігати фрагменти, котрі розрізняються спектральною яскравістю, що обумовлено різними коефіцієнтами відбиття, поглинання або випромінювання. Крім того об'єми оптичної інформації про досліджувані об'єкти значно збільшуються порівняно з випадком, коли об'єкт спостерігають у широкому спектральному діапазоні, наприклад, за допомогою звичайного тепловізора [8]. Гіперспектральні зображення отримують за допомогою цифрових датчиків (оглядові спектрометри), котрі вимірюють відбиту (розсіяну, випромінену) поверхнею досліджуваного об'єкта енергію у досить вузьких спектральних областях, що знаходяться в різних спектральних діапазонах. Таким чином, отримані за допомогою оглядових спектрометрів гіперспектральні дані являють собою практично безперервний спектр для кожного елементу зображення (пікселя) [8].

Основними робочими параметрами гіперспектрометрів є:

- робочий спектральний діапазон;
- кількість спектральних зон і спектральна роздільна здатність;
- просторова роздільна здатність;
- кут зору (огляду);
- відношення сигнал/шум;
- динамічний діапазон;
- розрядність цифрових даних;
- продуктивність (швидкість запису інформації та її об'єм) [9].

Що стосується гіперспектральних сенсорів, то вони бувають двох типів: з зарядовим зв'язком (CCD) та додаткові метал-оксид-напівпровідникові сенсори (CMOS) [10]. Сенсори CCD і CMOS різняться в основному тим, як вони обробляють вхідну енергію. Для CCD необхідно переміщення електричних зарядів, що накопичились на фотодіодах, в інше місце, при цьому кількість зарядів може бути виміряна. CMOS має фотоприймач та посилювач зчитування, інтегровані в єдиний пристрій, здатний перетворювати сигнал від вхідних електронів – перетворених фотонів. У цьому причина, чому технологія CMOS працює швидше при зміні інтенсивності світла. Однак, він більше піддається шуму і темновим токам, ніж CCD із-за мікросхеми на кристалі, що використовуються для передачі та посилення сигналів і в результаті більш низького динамічного діапазону чутливості [10].

Виділяють чотири режими отримання даних:

- точкове сканування (whiskbroom);
- лінійне сканування (pushbroom);
- плоске сканування;
- одиночний кадр (single shot).

Режим whiskbroom отримує всі полоси попіксельно, переміщуючи детектор у площині x - y , для зберігання даних у формі масиву попіксельного запису спектральних каналів (VIP), режим pushbroom працює аналогічно, але замість піксельного сканування формується лінія, яка записується в масив полінійного запису спектральних каналів (BIL). Декілька інших характеристик режиму pushbroom включає компактний розмір, невелику масу, більш просте управління і більш високий рівень сигналу. В режимі плоского сканування створюється масив поканалного запису (BSQ), що складається із декількох зображень, знятих за один раз, кожне із яких має спектральні дані відносно всього даного простору x - y . Є ще режим, який отримує всі просторові і спектральні дані одночасно – одиночний кадр [10].

На рисунку 1 наведені гіперспектральні режими отримання даних.

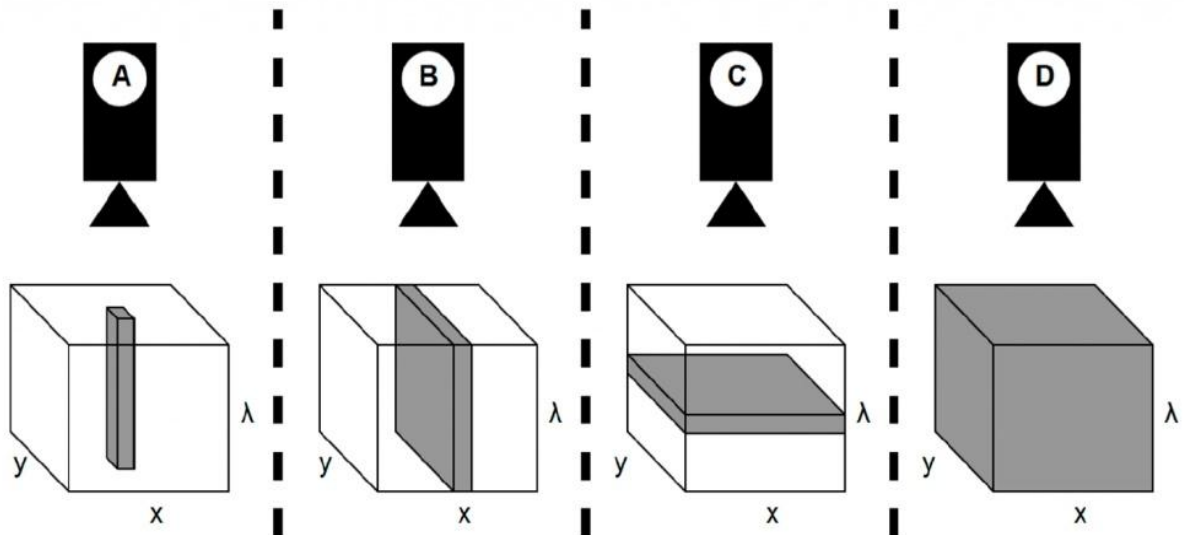


Рис.1. Гіперспектральні режими отримання даних – (A) whiskbroom; (B) pushbroom; (C) плоске сканування; D) одиничний кадр (single shot)

На теперішній час став популярним та економічно ефективним спосіб дистанційного зондування землі за допомогою БпАК з малогабаритними та легкими сенсорами. Розвиток гіперспектральних технологій призводить до створення все менших та легких сенсорів, які можуть бути встановлені на БпЛА для виявлення ВВП [11]. БпЛА може управлятися дистанційно або мати запрограмований маршрут для виконання автономного польоту з використанням вбудованого автопілота. Як правило, це потребує наземного поста управління і зв'язку, наявності приладів для виконання польотних завдань. Що стосується обробки гіперспектральних даних, треба виконати ряд дій:

- отримання зображення;
- калібровку;
- спектральну/просторову обробку;
- зменшення розмірності;
- задачі пов'язані з розрахунками (наприклад, аналіз, класифікація, виявлення і т.д.) [11].

Перед початком гіперспектральної зйомки необхідно відкалібрувати все обладнання, включаючи інерціальний пристрій вимірювання (IMU) і сенсор. Радіометрична і геометрична корекція і спектральна калібровка при використанні гіперспектральних сенсорів, встановлених на БпЛА, служить для отримання достовірних даних. Деякі фактори, наприклад, транспортування і установка сенсора можуть призвести до необхідності нової калібровки. Як радіометричні, так і геометричні поправки можуть бути виконані з використанням програмних засобів, що надаються виробником гіперспектрального сенсора.

Після етапу отримання гіперспектральних даних потрібні деякі операції попередньої обробки для отримання кількісної інформації досліджуваної області. Оцінка якості гіперспектральних даних є актуальною для попередньої обробки. Важливим критерієм якості гіперспектральних даних є відношення сигнал/шум (SNR). Кількісний аналіз гіперспектральних даних потребує точної оцінки SNR. Корекція/поліпшення сигналу включає в себе відновлення (тобто зменшення шуму та поліпшення спектра), об'єднання просторових даних, просторово-спектральне об'єднання даних, об'єднання даних з декількох джерел [11].

За допомогою гіперспектральних сенсорів генеруються великі об'єми даних, однак БпЛА мають обмежене корисне навантаження, тобто використання обмеженої кількості запам'ятовуючих пристроїв на борту. Для вирішення цього питання пропонуються деякі методи, наприклад, стиснення даних.

Після операції попередньої обробки даних наступним етапом є обробка даних і аналіз. По суті, детектування правильних і аномальних значень полягає у використанні метода двоїчної класифікації, який маркує кожний піксель в гіперспектральному масиві на потрібний, непотрібний або фоновий [11].

В ряду методів виявлення ВНП значуще місце займає пошук магнітних аномалій (MAD – magnetic anomaly detection), що створюються феромагнітними металевими оболонками абсолютної більшості ВНП [2]. При цьому безоболонкові ВНП або спеціальні боєприпаси не виявляються. MAD – один із самих “глибоких” методів пошуку, що дозволяє виявити ВНП на глибинах до 8 м. Крім того, магнітометричний метод є пасивним, що забезпечує не підлив ВНП ініціюючими фізичними полями при активному зондуванні, що часто необхідно.

Магнітометричний метод пошуку ВНП реалізується за допомогою пасивних “векторних” градієнметрів, які максимально усувають дію постійного магнітного поля Землі, що має незначний просторовий градієнт [2]. Такі пристрої використовують два ідентичних датчика-феррозонда, які рознесені вздовж осі чутливості на 25 см – 170 см і які реєструють з великим градієнтом магнітні аномалії, ймовірно, пов’язані з ВНП. Феррозонд являє собою котушку індуктивності з нелінійним сердечником. Найчастіше в якості такого сердечника використовується пермалоева проволочка [12]. На рисунку 2 наведений графік, що пояснює принцип дії феррозонда.

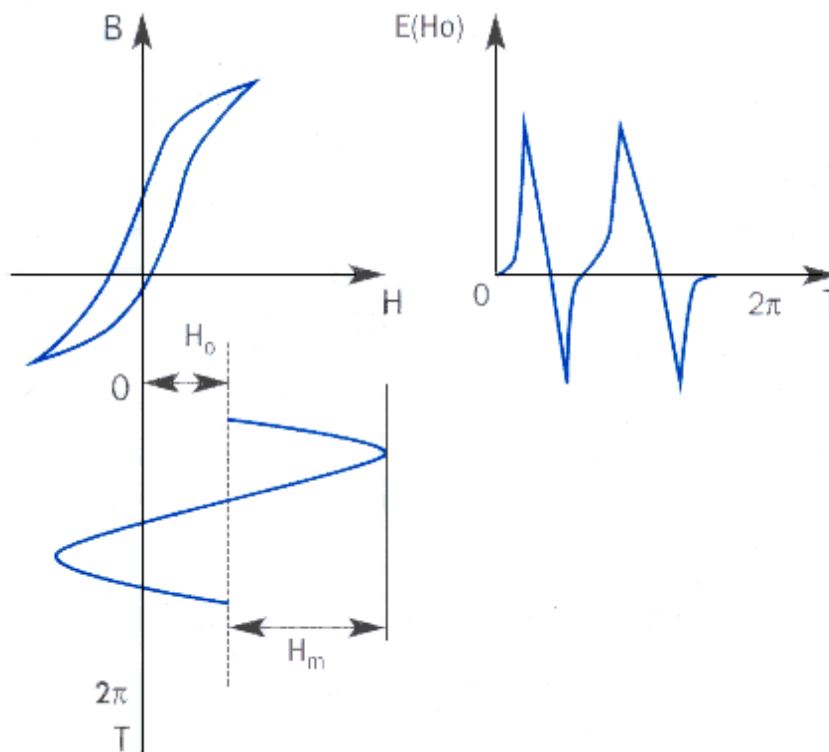


Рис.2. Принцип дії феррозонда

Якщо через котушку збудження пропустити змінний струм, який створить змінне поле з амплітудою напруженості H_m , і прикласти до феррозонду співвісне постійне поле напругою H_0 , то на виході приймальної котушки феррозонда з’явиться напруга, пропорційна постійному магнітному полю H_0 і з подвоєною частотою. Поява напруги подвоєної частоти обумовлено нелінійною характеристикою сердечника феррозонда. Ця напруга і є сигналом, по якому судять про зовнішнє магнітне поле [12].

Неградієнтометричні прибори пошуку засновані, як правило, на квантових магнітометрах з оптичною накачкою парів цезія та калія, застосовуються в основному для зняття карти магнітного поля на місцевості. Після цього можливий пошук ВНП по карті магнітних аномалій, але “з ходу” він ускладнений. Крім того, квантово-оптичні пристрої

відносяться, швидше, до класу наукових і мають високу вартість, потребують більш компетентного поводження, ніж це вимагається для пошукових робіт [2]. У доступних наукових працях і звітах відмічається, що найкращі характеристики з виявлення ВВП мають прилади, що комбінують пасивний магнітометричний та активний електромагнітний принцип виявлення. Такі системи, що виявляють будь-який тип металу, типово конструюються у вигляді лінійки датчиків. Проте, вони досить дорогі, тому випускають одиничні екземпляри [2].

Як показують результати аналізу та моделювання [2], якщо карта магнітних аномалій місцевості точна, з'являється можливість оцінки не тільки глибини залягання ВВП і його типу, але і характеру орієнтації предмета у ґрунті. “Ідеальний” магнітний момент M , що характеризує предмет, прикладений в точці, не має полюсів – вони нібито злиті. Реальні предмети, в тому числі ВВП, мають полюси: позитивний, звідки силові лінії виходять, і негативний, куди силові лінії входять, тут концентрація силових ліній максимальна [2]. Отже, поблизу цих точок магнітна аномалія досягає максимумів (з різними знаками), і якщо вони рівні, то предмет знаходиться горизонтально. Якщо на карті аномалій виявляється тільки один полюс, це значить, що ВВП розташований вертикально і другий полюс (непомітний) знаходиться під першим. Чим довший предмет, чим більше він відрізняється від кулі, тим більше розходження полюсів. Як правило, полюси розміщуються на крайніх гранях максимального розміру об'єкта в силу анізотропії форми [2]. Визначення місця розташування полюсів предмета дозволяє з'ясувати його орієнтацію в ґрунті та зробити процес розмінування більш контрольованим.

Складання карти магнітних аномалій за допомогою магнітометру, а краще за допомогою мультисенсорної системи, дозволяє оцінити глибину залягання, розміри (величину) і орієнтацію в ґрунті можливого ВВП, а значить полегшити процес наступного розмінування. Однак, такі можливості надає тільки гуманітарне розмінування. У бойових або наближених до них умовах, при задачі виявлення ВВП “з ходу”, складання карти магнітних аномалій вкрай важке [2].

Для оцінки максимальної глибини h_{max} виявлення ВВП за допомогою магнітометру застосовується формула [2]:

$$h_{max}^I = 8 * d^{3/4}, \quad (6)$$

де d – діаметр (мінімальний габарит) ВВП.

В умовах мокрого ґрунту (провідністю 10^2 Ом·м – 10^3 Ом·м), за наявності постійної намагніченості і “витягнутості” реального предмета велика гранична дальність виявлення для магнітометру забезпечується практично завжди [2].

Виявити металеві предмети в нейтральному або слабопровідному середовищі за рахунок їх провідності дозволяють електронні прилади металодетектори (металошукачі) [6]. Різні металодетектори працюють на різних частотах. Це пов'язано з фізикою явищ розподілу електромагнітних хвиль. Так, металодетектори, які працюють на низьких частотах, можуть знаходити предмети глибоко і великого розміру. При цьому на поверхні землі вони не в змозі помітити металеві предмети. Якщо частота роботи металодетектора висока, то прилади добре виявляють невеликі об'єкти, але не можуть знаходити предмети в глибині ґрунту. Є моделі з частотою, що налаштовується. Приклад частотних металодетекторів за призначенням:

– глибинні металодетектори – працюють на частоті – 6,6 кГц. Глибина виявлення – близько 4 м;

– ґрунтові металодетектори для пошуку невеликих предметів – до 22,5 кГц. Глибина виявлення від 40 см до 1 м – 1,5 м [6].

Велике поширення металодетекторів продиктовано трьома основними причинами:

– відносно невелика вартість;

– можливість виявлення будь-яких металів;

– розширена сфера застосування – пошук скарбів, трубопроводів і кабелів, археологія [6].

Металодетектори застосовуються для пошуку та виявлення ВНП. Для металодетектора важлива не стільки маса конкретного ВНП, скільки площа поверхні, пов'язана з його діаметром d . При цьому для оцінки максимальної глибини h_{max} виявлення ВНП за допомогою металодетектора в умовах сухого ґрунту (провідністю $10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м} - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), допустима інженерна формула [2]:

$$h_{max}^2 = 11d, \quad (7)$$

де d – діаметр (мінімальний габарит) ВНП.

Експериментальний порівняльний аналіз пошукової здатності металодетекторів та магнітометрів показує, що для “малих” і “середніх” ВНП (калібром від 20 мм до 81 мм) при глибинах пошуку до 0,5 м (і типових ґрунтах) перші кращі. В області калібрів ВНП 100 мм-155 мм характеристики зрівнюються, далі має перевагу магнітометр [8].

Найголовнішим параметром металодетектора є його чутливість, яка визначає максимальну дальність виявлення предмета. Для магніточутливих металодетекторів прийнято чутливість позначати величиною магнітної індукції поля, що здатен зареєструвати прилад. Зазвичай, чутливість вимірюють у нанотеслах (нТл) $1 \text{ нТл} = (10^{-9}) \text{ Т}$ [12]. Окрім чутливості, для визначення якості приладу використовують такий параметр, як роздільна здатність, який також вимірюється в нанотеслах і визначає ту мінімальну різницю індукції, що можна зареєструвати приладом. Сучасні металодетектори мають чутливість від 0,01 нТл до 1 нТл, в залежності від принципу дії і класу задач, які вирішуються [12].

На сьогоднішній час найбільше поширення отримали квантові прилади, засновані на ефекті ядерного магнітного резонансу і ефекту Зеемана з оптичною накачкою [12]. У металодетекторах з оптичною накачкою робочої речовини фіксується частота високочастотного генератора при її збігах з частотою інверсних квантових переходів між підрівнями тонкого та надтонкого магнітного розщеплення. Момент збігу спостерігають по резонансному поглинанню світлової енергії, що супроводжується розсіянням або заломленням світла під час його взаємодії з атомами робочої речовини. Чутливість таких металодетекторів досягає 10^{-13} Тл [12].

Існує ще клас надпровідних металодетекторів, заснованих на ефекті Джозефсона. В якості вимірювального перетворювача в таких металодетекторах використовуються надпровідні квантові інтерферометри (СКВІД) постійного або змінного струму. В металодетекторах зі СКВІД постійного струму приріст зовнішнього магнітного потоку перетворюється в осцилюючу напругу на контактах чутливого елемента: при вимірюванні підраховується повне число осциляцій напруги за час накладення потоку. В металодетекторах зі СКВІДом змінного струму осцилюючою функцією магнітного потоку є повна індуктивність надпровідного кільця і, отже, напруга на зв'язаному з ним високочастотному коливальному контурі. У надпровідних металодетекторах досягнутий рекордний рівень чутливості 10^{-15} Тл на частотах 0 Гц – 1 Гц [12].

Загальним недоліком квантових та надпровідних металодетекторів є їх низька швидкодія порівняно з ферозондовими металодетекторами, що може призводити до пропуску об'єктів пошуку при швидкому скануванні. Крім того, робоча речовина квантових приладів має нетривалий термін служби і часто небезпечна для оточуючого середовища, що здорожчує експлуатацію. Все це пояснює застосування ферозондових пошукових приладів і появу нових модифікацій приладів з ферозондовими перетворювачами [12].

Висновки. У зв'язку з розвитком безпілотних літальних апаратів на сьогоднішній час все більшої актуальності набирає ідея щодо застосування БПЛА для ведення розвідки мінної обстановки, виявлення мін і дистанційного їх знищення. Разом з тим, особлива увага повинна звертатись на забезпечення потрібного рівня якості процесів розмінування, зменшення до мінімального рівня вибухонебезпечних загроз та зниження вартості робіт з розмінування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кириленко В.А. Глобальна проблема розмінування: стан та підходи до розв'язання [Електронний ресурс] / В.А. Кириленко, В.Р. Нероба // Національна академія Державної прикордонної служби України ім.Б.Хмельницького. – Режим доступу: znp-cvsvd.nuou.org.ua. – Назва з екрана.
2. Звезинский С.С. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов [Електронний ресурс] / С.С. Звезинский, И.В. Парфенцев. – Режим доступу: hcyberleninka.ru. – Название с экрана.
3. Смольков О.Ю. Науково-методичний підхід щодо обґрунтування вимог до дистанційно-керованих радіолокаційних комплексів виявлення вибухових пристроїв з неконтактними датчиками цілі / О.Ю. Смольков, В.І. Коцюруба, К.Ю. Гунбін // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: електрон. наук. фахове вид. – Харків: ХНУПС, 2020. – Вип. №4(41). – С. 145–150. – DOI:10.30748/nitps.2020.41.17.
4. Дослідження можливостей виявлення вибухонебезпечних предметів за допомогою безпілотних авіаційних комплексів: звіт про науково-дослідну роботу / Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки; наук. керівник: В.Г. Башинський; відп. викон.: В.А. Журахов – Чернігів: ДНДІ ВС ОВТ, 2020. – 101 с. – Інв. № 2994.
5. Звиглянич С.М. Вибір раціонального варіанту проведення повітряної розвідки безпілотними літальними апаратами / Звиглянич С.М., Ізюмський М.П., Орлов С.В. // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: електрон. наук. фахове вид. – Харків:ХНУПС, 2018. – Вип. № 4(33). – С. 21–27. – DOI:10.30748/nitps.2018.33.03.
6. Металлоискатель [Електронний ресурс] – Режим доступу: ru.m.wikipedia.org. – Название с экрана.
7. 10 тепловизоров для дронов и как работает тепловизионная съемка [Електронний ресурс]. – Режим доступу: sovzond.ru/press-center/articles/bpla/5652. – Назва з екрана.
8. Скворцов Л.А. Дистанционное обнаружение взрывчатых веществ с помощью методов активного формирования спектральных изображений // Квантовая электроника: электр. наук. спец. издание. – 2011. – Т. 41. – Вип. № 12. – С. 1051–1060. – Режим доступу: www.quantum-electron.ru. – Название с экрана.
9. Донец В.В. Особенности применения приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах / В.В. Донец, Л.И. Муравський // Космічна наука і технологія. – Київ: НАНУ, 2012. – Т. 18. – Вип. № 3. – С. 20–37.
10. Гиперспектральные камеры. Принцип работы, устройство и производители [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.spectraltechnology.ru. – Название с экрана.
11. Гиперспектральные снимки: обзор сенсоров для БПЛА, систем обработки данных и приложений для сельского и лесного хозяйства [Електронний ресурс]. – Режим доступу: sovzond.ru/press-center/articles/bpla/5601. – Название с экрана.
12. Арбузов С.О. Магниточувствительные поисковые приборы// Специальная техника. 2000. №6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: bnti.ru/showart.asp?aid=873&lvl=02.01.01.02. – Название с экрана.

Молочко Світлана Миколаївна

науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2012-038X>
+38097-769-36-896

Svitlana Molochko

Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2012-038X>
+38097-769-36-896

Башинський Володимир Георгійович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, начальник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1712-7772>
e-mail: dndivs@ukr.net

Каламура Олег Геннадійович

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3899-3821>
+38068-769-80-52

Журахов Василь Анатолійович

старший науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-0605-5729>
+38099-347-06-96

Volodymyr Bashynskyi

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, The Laureate of State Prize of Ukraine in sphere of science and technology, Chief of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1712-7772>
e-mail: dndivs@ukr.net

Oleh Kalamurza

Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3899-3821>
+38068-769-80-52

Zhurakhov Vasyl

Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-0605-5729>
+38099-347-06-96

**ANALYSIS OF THE CURRENT STATE, CHARACTERISTICS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF
EXPLOSIVE ORDNANCE DETECTION SENSORS MOUNTED ON UNMANNED AERIAL SYSTEMS
S Molochko, V Bashynskyi, O Kalamurza and V Zhurakhov**

In recent years, the international community has become increasingly aware of the scale and severity of the problems posed by landmines and explosive remnants of war, including unexploded ordnance, gradually agreeing that this is a global problem that requires international concerted actions [1].

Significant excess of pace of development and intensity of mines use in comparison with the means of demining determine the urgency of the problem of ensuring the required level of their technical perfection. At the same time, special attention should be paid to ensuring the required level of quality of demining processes, reducing to a minimum level of explosive threats and cost of demining [2]. In modern economic conditions, the high efficiency of UXO detection in a certain area with relatively minimal cost of material and human resources is of great importance.

The article analyzes the possibility of detecting explosive ordnance using a thermal imager, hyperspectral camera, magnetometer, metal detector which are installed on an unmanned aerial system (UAS). In addition, there was given consideration to the properties of sensors for detecting explosive ordnance which will ensure their full use during humanitarian demining: performance, transportability, survivability, reliability, failure-free, durability, maintainability, storage ability, cost effectiveness. Explosive ordnance detection sensors mounted on UAS must have their own navigation system or be connected to an on-board navigation system that links information from the sensors to the terrain. It must be possible to determine the coordinates of any object after landing an UAS and process information from the sensors. The calculations were made regarding the effectiveness of actions for searching and detecting explosive ordnance using an unmanned aerial system.

Keywords: *explosive ordnance, thermal imager, hyperspectral camera, magnetometer, metal detector, unmanned aerial system.*