

Станкевич С. А., доктор технічних наук, професор¹ (0000-0002-0889-5764)
Мосов С. П., доктор військових наук, професор² (0000-0003-0833-3187)
Ворович Б. О., кандидат військових наук, доцент³ (0000-0002-4083-3707)

¹ – Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ;

² – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Київ;

³ – Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ

Систематизація умов і факторів, які впливають на застосування безпілотного літального апарата коптерного типу під час виявлення наземних мін

Резюме. У статті на підставі проведеного аналізу тематичних публікацій сформульоване проблемне питання систематизації умов і факторів, які впливають на безпілотний літальний апарат коптерного типу і встановлені на ньому датчики оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра під час виявлення наземних мін.

Ключові слова: наземна міна; безпілотний літальний апарат коптерного типу; аерознімання.

Постановка проблеми. Наземна міна – це фактично зброя, зазвичай закопана у ґрунт і вибухає під час наступу (наїзду) на неї, та призначена для нанесення ран або вбивства особового складу (знищення військової техніки) противника, залишаючи довгострокові психологічні наслідки і створюючи фінансовий тягар для суспільств [1].

Вирішальним кроком для запобігання подальших жертв від наземних мін є їх виявлення та знищення. Міни, кількість яких у світі за інформацією гуманітарної організації CARE (Женева, Швейцарія) нараховується близько 110 млн шт., вважаються глобальною проблемою для нашої планети. Питання мінної безпеки залишаються актуальними на теперішній час на територіях колишньої Югославії, Кавказьких республік, в Іраку, Афганістані, Сирії, країнах Південно-Східної Азії (Кампучія, Лаос, В'єтнам), Південній Африці, Близькому Сході та багатьох інших регіонів світу, зокрема і в Україні [2], і потребує пошуку дієвих рішень щодо його розв'язання.

Одним із перспективних світових підходів для розв'язання зазначеної проблеми є застосування безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) [3]. Для виконання завдань виявлення мін на поверхні ґрунту або розташованих у ґрунті використовуються різні конфігурації датчиків, які встановлюються на БпЛА і діють у різних діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектра, створюючи різні сигнатури мін з метою забезпечення заданої імовірності **P** їх виявлення.

Виконання завдань виявлення мін, як показує аналіз, може відбуватися протягом доби, у різних погодних умовах і в різні періоди року, що, наприклад, обмежує можливості датчиків видимого діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра та інфрачервоних датчиків унаслідок оптичного замутнення (турбулентності) атмосфери, а також впливає на стан ґрунту (наприклад, звичайна трава, висока суха трава, розмитість поверхні ґрунту дощем, новий шар снігу тощо).

Усе це потребує визначення та систематизації умов і факторів, які впливають і впливатимуть на БпЛА і встановлені на ньому датчики оптичного діапазону (ДОД) довжин хвиль електромагнітного спектра під час виявлення наземних мін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями, пов'язаними з дослідженнями щодо застосуванням БпЛА для виявлення наземних мін з використанням встановлених на них датчиків оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра, займалася і займається низка українських та іноземних фахівців і вчених.

Так, у [3] проведено аналіз сучасного досвіду іноземних країн з питань застосування безпілотної авіації для вирішення завдань розвідки мінної обстановки, виявлення та дистанційного знищення мін як під час бойових дій, так і у прифронтовій полосі та на державному кордоні, а також досліджено підходи низки іноземних країн до використання різноманітних датчиків, які

встановлюються на БпЛА, для виявлення та знищення мін.

Водночас, дослідження умов і факторів, які впливають на функціонування БпЛА і встановлених на ньому датчиків не проводилися, що обмежило можливості аналізу ефективності того або іншого підходу.

У [4] наведено спосіб конфігурації датчиків спостереження (цивільної розвідки) на мініатюрному БпЛА коптерного типу зі змінним модулем збирання і передавання даних. До можливих датчиків повітряного спостереження (цивільної розвідки) у корпусі змінного модуля збирання і передавання даних, які можуть встановлюватися на борту безпілотної, відносяться: чорно-білі та кольорові відеокамери; камери з кольоровим кадром з широким полем огляду; інфрачервоні та ближні інфрачервоні датчики; мультиспектральні датчики; гіперспектральні датчики; радар із синтезованою апертурою і діодний лазерний сканер. До недоліків наведеного способу слід віднести те, що в ньому не враховуються умови навколишнього середовища (погодні умови, час доби і період року) і обмежена кількість одночасних сигнатур, що впливає на ймовірність виявлення наземних об'єктів.

У способі [5] конфігурації датчиків моніторингу на борту БпЛА для дистанційного виявлення, підтвердження і підризу вибухових пристроїв (мін, саморобних вибухових пристроїв тощо) у ґрунті запропоновані модулі оптичного, інфрачервоного, хімічного та радіолокаційного виявлення мін без визначення умов і факторів, які впливають на ймовірність виявлення мін із застосуванням БпЛА і датчиків.

Авторським колективом у [6] досліджено світову глобальну проблему розмінування і проведено аналіз сучасних підходів до розв'язання проблеми розмінування із застосуванням робототехнічних комплексів на наземній платформі, а також комплексів розвідки, виявлення та знищення мін і мінно-вибухових пристроїв на базі БпЛА. Разом з тим дослідження умов і факторів, що впливають на застосування робототехнічних комплексів, до яких відносяться і безпілотні авіаційні комплекси з датчиками оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра, не проводились.

У колективній праці [7] акцентується увага на технології виявлення наземних мін з використанням сигнатур від датчиків

оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра, що отримуються у різних умовах застосування БпЛА без дослідження конкретних умов і факторів, які впливають на застосування БпЛА і датчиків.

У статті [8] розглянуто підходи країн НАТО до розвідки і подолання мінних полів в умовах сучасних війн. Одним з підходів зазначається можливість використання інфрачервоних датчиків без аналізу умов і факторів, здатних впливати на процес розвідки мін із використанням такого виду датчиків.

У праці [9] авторами обґрунтовано доцільність використання способу повітряної розвідки з використанням БпЛА районів інтенсивного застосування мінної зброї, а також запропоновано деякі тактичні прийоми застосування БпЛА та зазначені вимоги.

Відповідний крок до визначення та систематизації умов і факторів, які впливають на БпЛА і встановлені на ньому датчики під час виконання завдань у сфері цивільного захисту зроблено авторським колективом у [10]. До того ж слід зазначити, що авторами використаний дещо обмежений математичний апарат без визначення параметрів аерознімання наземних об'єктів з урахуванням заданої ймовірності їхнього виявлення P і технічних характеристик датчиків, встановлених на БпЛА.

Незважаючи на значну кількість праць, присвячених питанням застосування БпЛА для виявлення наземних об'єктів і мін як в Україні, так і за її межами, питання визначення та систематизації сукупності умов і факторів, які впливають і впливатимуть на функціонування БпЛА і встановлених на них датчиків оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра під час виконання завдань виявлення наземних мін залишаються в стані актуальних.

Мета статті - визначення та систематизація умов і факторів, які впливають і впливатимуть на функціонування БпЛА коптерного типу з встановленими на ньому датчиками оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектра під час виконання завдань виявлення наземних мін.

Виклад основного матеріалу. Дослідження умов і факторів, які впливають і впливатимуть на функціонування БпЛА, пов'язане, насамперед, з визначенням параметрів аерознімання з БпЛА коптерного типу, потрібних для виявлення мін із заданою ймовірністю P , зважаючи на характеристики типового зразка наземної міни, що

виявляється, і технічних характеристик ДОД довжин хвиль електромагнітного спектра, що встановлюються на безпілотник.

До основних параметрів аерознімання, які визначаються, належать: потрібна висота аерознімання H ; забезпечувана просторова розрізненість на місцевості d ; масштаб одержуваних зображень $1/m$; ширина смуги огляду місцевості B ; кількість прольотів k , необхідних для покриття заданої ділянки місцевості [11].

У загальному вигляді вираз для ймовірності P виявлення наземної міни на багатоспектральному зображенні з урахуванням її спектральної сигнатури і особливостей її форми та просторової розрізненості d має вигляд [12]:

$$P = \exp \left[\frac{2\sqrt{2} \ln \alpha \operatorname{erf}^{-1}(2\alpha - 1) \left(\frac{d}{d_0} \right)^2}{\psi} \right], \quad (1)$$

де ψ - еквівалентне відношення “сигнал-шум” у багатоспектральному зображенні;

d_0 - характерна детальність об’єкта, що виявляється, тобто детальність, потрібна для впевненого виявлення цього об’єкта;

α - забезпечувана достовірність виявлення за умови $d = d_0$ і достатньо високого відношенні “сигнал-шум”.

Просторова розрізненість на місцевості (детальність) – це мінімальний розмір елемента місцевості, зображення якого на аерознімку ще помітно окремо. У першому наближенні детальність аерознімання дорівнює розміру проєкції fotocутливого елемента (фотодетектора) багатоелементного фотоприймального пристрою ДОД на місцевість [13]:

$$d = \frac{aH}{f}, \quad (2)$$

де a - лінійний розмір фотодетектора;

f - фокусна відстань ДОД.

Масштаб зображення – це відношення лінійних розмірів тієї ж самої ділянки на зображенні l і на місцевості L [14]:

$$\frac{1}{m} = \frac{l}{L} = \frac{f}{H}. \quad (3)$$

Ширина смуги огляду визначається кількістю фотодетекторів q ДОД поперек напрямку аерознімання [15]:

$$B = qd = \frac{qaH}{f}. \quad (4)$$

Зі свого боку, кількість прольотів (маршрутів аерознімання), необхідних для покриття ділянки місцевості поперечним розміром S визначається шириною смуги огляду [16]:

$$k \approx \operatorname{int} \left(\frac{S}{B} \right) + 1, \quad (5)$$

де $\operatorname{int}(\dots)$ - функція взяття цілої частини числа.

Якщо продовжний розмір заданої ділянки дорівнює L , то кількість кадрів в одному маршруті t аналогічно з (5) складе

$$t \approx \operatorname{int} \left(\frac{L}{rd} \right) + 1, \quad (6)$$

де r - кількістю фотодетекторів у кадрі вздовж напрямку аерознімання.

Таким чином, визначальним параметром аерознімання, від якого залежать усі інші параметри, виступає висота H , а інваріантами ДОД – розмір фотодетектора a , кількість фотодетекторів у кадрі $q \times r$ і фокусна відстань f .

Потрібна висота аерознімання, як впливає з (2), визначається потрібною просторовою розрізненістю на місцевості d :

$$H = \frac{f d}{a}. \quad (7)$$

Зі свого боку, потрібна просторова розрізненість d майже завжди визначається з міркувань виявлення чи розпізнавання об’єкта аерознімання. Найбільш розповсюджені й адекватні моделі виявлення є статистичними [17].

Застосування поняття “просторова розрізненість” до ДОД з цифровою реєстрацією зображень має специфічні особливості в разі проведення знімання на гранично можливому для відтворення цифровим ДОД розмірі об’єктів – порядку проєкції елемента дискретизації на земну поверхню [18].

У такому разі має йтися про визначення порогу виявлення окремого ансамблю елементів дискретизації на фоні інших за його радіометричними характеристиками – інтенсивністю, радіометричним або оптичним контрастом тощо. З урахуванням стохастичного характеру відтворення дистанційних зображень, а також шумів приймального оптико-електронного тракту ДОД, видається логічним використання для оцінювання якості цифрового знімка класичних методів статистичного виявлення детермінованого сигналу на фоні адитивної гаусівської завади [19].

Оскільки в процесі аерознімання реальні поля яскравості, як правило, мають стохастичну піксельну текстуру [20], то достовірність виявлення міни на оточуючому фоні оцінюється за допомогою статистичної перевірки гіпотез з простою альтернативою [21]. Нехай зображення міни описується одномодовим нормальним розподілом яскравості із середнім x_0 і дисперсією σ_0^2 , а фон має середнє x та дисперсію σ^2 . Тоді для критерію максимальної правдоподібності імовірність помилки ε складе [22]

$$\varepsilon \cong 1 - \Phi \left(\frac{|x_0 - x| \sqrt{n}}{\sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2}} \right), \quad (8)$$

де $\sigma_0^2 + \sigma^2 = D$ – повна дисперсія фрагмента зображення, що аналізується.

З виразу (8) випливає вимога до мінімально необхідної кількості пікселів n у статистичній вибірці [23]:

$$\sqrt{n} \cong \frac{\sqrt{D}}{|x_0 - x|} \Phi^{-1}(1 - \varepsilon). \quad (9)$$

Мінімальна потужність вибірки n має фізичний сенс сумарної кількості пікселів у сегментах об'єкта та фону на зображенні, які розділяються із заданою імовірністю $1 - \varepsilon$ [24]. Під час сканування зображення доцільно обирати кількості пікселів у сегментах об'єкта та фону рівними, тобто на об'єкт припадає $n_0 = n/2$ пікселів. З іншого боку, при лінійному розмірі об'єкта B_0 кількість пікселів розміру d у круговому сегменті становить

$$n_0 = \frac{\pi \left(\frac{B_0}{d} \right)^2}{4}. \quad (10)$$

Ураховуючи спільно (9) та (10), можна отримати оцінку потрібної просторової розрізненності d через інші параметри у вигляді

$$d \cong \frac{|x_0 - x| B_0}{\sqrt{\frac{2D}{\pi} \Phi^{-1}(1 - \varepsilon)}}, \quad (11)$$

при цьому потрібна висота аерознімання за (7) визначається як

$$H \cong \frac{f |x_0 - x| B_0}{a \sqrt{\frac{2D}{\pi} \Phi^{-1}(1 - \varepsilon)}}. \quad (12)$$

Вираз (12) є визначальним для планування аерознімання під час пошуку наземних мін. Додатковим обмеженням при цьому є накриття всього об'єкта полем огляду знімальної системи: $B \geq B_0$.

Наприклад, для температурного аерозображення рис. 1, одержаного за допомогою інфрачервоної камери FLIR Tau2 з фокусною відстанню $f = 19$ мм і розміром фотодетектора $a = 17$ мкм ширина смуги огляду з висоти $H = 10$ м буде $B = 5,73$ м, що цілком достатньо для виявлення окремих наземних мін і підтверджено натурними дослідженнями на полігоні в/ч А2641.

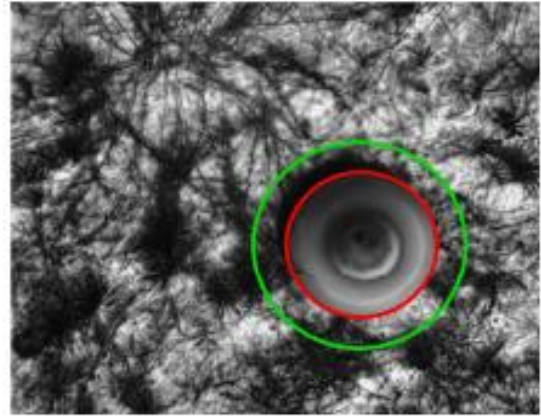


Рис. 1. Інфрачервоне зображення міни

Статистика об'єкта (всередині внутрішнього кола) і фону (за межами внутрішнього але всередині зовнішнього кола) така: $x_0 = 85,58$; $\sigma_0 = 43,95$; $x = 70,22$; $\sigma = 51,04$. Впевнене виявлення міни ($\varepsilon = 0,05$) розміром $B_0 = 12$ см з такими параметрами згідно з (12) забезпечуватиметься з висот аж до $H = 23,3$ м, розрізненість на місцевості при цьому становитиме $d = 2,08$ см.

Усі наведені співвідношення справедливі для одновимірних (панхроматичних) аерозображень. У разі багатовимірних аерозображень, наприклад, багатоспектральних, звичайно змінюється модель розрахунку ймовірності (8), а услід за нею – і співвідношення (9), (11) і (12), але загальна структура і порядок розрахунків залишаються тими ж самими.

Визначення основних параметрів аерознімання з БПЛА коптерного типу, потрібних для виявлення наземних мін із заданою імовірністю P , дає змогу перейти до конкретизації та систематизації умов і факторів, які впливатимуть на функціонування ДОД БПЛА під час виявлення мін.

Платформою для розміщення ДОД є безпосередньо сам БПЛА коптерного типу. Безпілотник здійснює політ в умовах впливу на нього низки факторів (рис. 2) [3, 25, 26]: поставлене завдання щодо пошуку мін; особливості місцевості, де встановлені міни; управління БПЛА з боку зовнішнього пілота; метеорологічні умови; пориви вітру; пора

року; час доби; застосування противником стрілецької зброї проти БпЛА тощо. засобів РЕП і РЕБ, а також звичайної

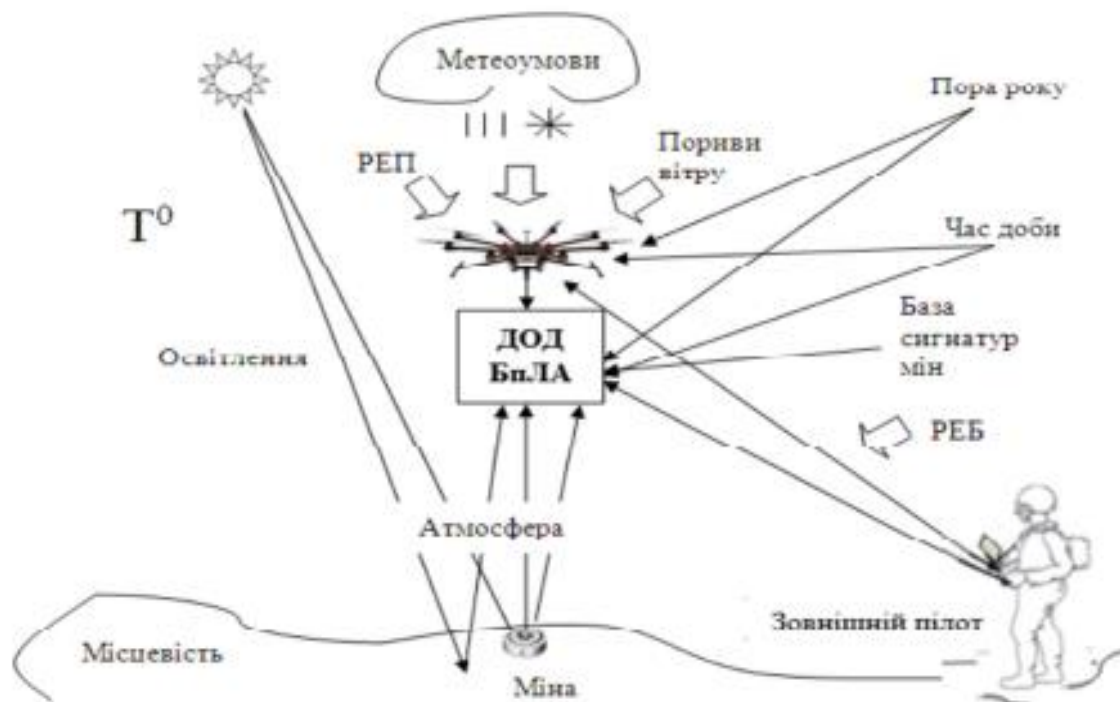


Рис. 2. Умови і фактори, що впливають і впливатимуть на функціонування БпЛА і встановлених на ньому ДОД

Зміст завдання щодо пошуку наземних мін обумовлюється визначенням ділянок місцевості, на яких треба провести аерознімання, а також вимогами до виявлення та розпізнавання мін – до виду, класу, підкласу, типу [27, 28].

Місцевість, де встановлені міни (мінні поля), характеризується своїм рельєфом (рівнинна, горбиста, гориста тощо), рослинним покривом, ґрунтом, маскувальними можливостями щодо мінування [27, 29].

Управляє польотом БпЛА зовнішній пілот. Якість управління залежить від кваліфікації зовнішнього пілота, його фізіологічного стану, рівня практичної навченості управляти БпЛА в різноманітних умовах (прості метеоумови, складні метеоумови, ранок, день, сутінки, ніч), володіння тактичними прийомами застосування БпЛА для виявлення мін в умовах різноманітної місцевості [25].

Метеорологічні умови безпосередньо впливають на застосування як БпЛА, так і функціонування ДОД. Це пов'язано з безпекою польотів БпЛА та управлінням його польотом у різних погодних умовах і під час виникнення різних атмосферних явищ (турбулентність атмосфери). Від кваліфікації зовнішнього пілота щодо управління безпілотником у простих і складних

метеоумовах залежить результат виконання ним поставлених завдань щодо виявлення наземних мін.

Турбулентність атмосфери здійснює безпосередній вплив на якість отримання результатів аерознімання із застосуванням ДОД, встановлених на БпЛА, тобто на імовірність P виявлення мін.

Окремим питанням вважається чутливість БпЛА до поривів вітру, що може призвести до аварії безпілотника та його повного руйнування під час падіння на місцевість. У разі сильного вітру управління БпЛА значно ускладнюється. Небезпечними вважаються пориви вітру від 15-20 м/с [25, 26].

Пора року (зима, весна, літо, осінь) обумовлює стан метеоумов і особливості виникнення турбулентності атмосфери, що, зі свого боку, впливає на безпеку польоту безпілотника і якість виконання аерознімання для виявлення наземних мін. Температурний режим безпосередньо впливає на експлуатаційні можливості БпЛА (сильний мороз, велика спека тощо).

Час доби (ранок, день, сутінки, ніч) впливає на зміну освітленості місцевості, що важливо як для управління БпЛА, так і для якості проведення аерознімання мін. Зовнішній пілот має бути підготовлений для управління БпЛА в умовах дня і ночі.

Важливе значення в умовах ведення бойових дій, як показує світовий досвід і досвід АТО/ООС, має застосування противником засобів РЕП і РЕБ, а також стрілецької зброї проти БпЛА, що може призводити до його повної втрати [25, 26].

Треба також звернути увагу на вібрації БпЛА під час польоту, що обумовлюються впливом на нього метеоумов і турбулентності атмосфери, а також роботою двигунів БпЛА.

Застосування ДОД, встановлених на БпЛА залежить від кваліфікації зовнішнього пілота, його фізіологічного стану (стан здоров'я, особливості зору, тренуваність стосовно різноманітних навантажень тощо), практичної навченості управляти ДОД під час ведення розвідки мінної обстановки з використанням БпЛА, а також шукати, виявляти та розпізнавати міни в різних метеорологічних умовах і в різні часи доби за їхнім зображенням на екрані дисплея [24, 25].

Як слідує з (3) масштаб m зображення на цифровому аерознімку, що виводиться на екран дисплея зовнішнього пілота БпЛА, залежить від висоти польоту H безпілота при фіксованій фокусній (еквівалентній фокусній) відстані f ДОД, або від відношення висоти польоту H до фокусної відстані f датчика аерознімання за умов наявності технічної можливості змінювати розмір фокусної відстані (оптичного зуму).

Масштаб m зображення впливає на величину ймовірності P виявлення та розпізнавання міни зовнішнім пілотом за її зображенням на екрані дисплея.

Атмосфера є середовищем, через яке проходить випромінювання, що несе інформацію про міни. Вона здатна ослабити як пряме сонячне випромінювання (див. рис. 2), так і відбите міною або місцевістю, де вона встановлена, через його розсіювання. Турбулентність атмосфери призводить до погіршення тонового контрасту зображення міни (контуру міни) на екрані дисплея зовнішнього пілота БпЛА, що, зі свого боку, знижує ймовірність P виявлення мін.

Важливим фактором є освітленість місцевості, де встановлена міна, яка залежить від висоти сонця над горизонтом. У разі зміни висоти сонця від 10° до 90° освітленість змінюється приблизно в п'ять разів, а у разі переходу від денних умов до нічних – у десять разів [30].

Пора року, унаслідок траєкторії руху нашої планети навколо сонця, призводить до зміни висоти сонця, що слід враховувати під

час планування повітряної розвідки мінної обстановки.

Вібрації БпЛА під час польоту можуть призводити до погіршення різкості зображення на екрані дисплея зовнішнього пілота, унаслідок виникнення лінійних і кутових переміщень датчиків аерознімання, що може стати причиною зсуву зображення у площині аерознімку. Для компенсації вібрацій БпЛА використовуються спеціальні стабілізовані платформи, на які розміщуються датчики аерознімання на БпЛА [25].

Важливе значення для отримання максимально можливого тонового контрасту і різкості зображення міни (контуру міни) на екрані дисплея зовнішнього пілота БпЛА та її виявлення має наявність попередньо створеної бібліотеки (бази) сигнатур мін, отриманих за допомогою ДОД.

Маскування мін під місцевість, де встановлюються міни, є важливим фактором протидії ДОД під час аерознімання з БпЛА щодо виявлення мін.

Значимим фактором вважається створення противником хибних мінних полів, що активно відбувалось, наприклад, під час війни в Іраку 1991 року [31].

Питання застосування БпЛА для виявлення мін залишається актуальним для України. За оцінками фахівців ЗС України станом на початок 2021 року замінованими залишалось близько 16 тис. км² у Донецькій і Луганській областях, проте точні показники невідомі [32].

До цього актуального напрямку приєдналась Національна академія наук України. Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України за безпосередньою фінансовою підтримкою НАН України розробляє технології автоматизованого виявлення та розпізнавання мін з використанням ДОД, що встановлюються на БпЛА коптерного типу. Результати проведених протягом 2020–2021 рр. теоретичних і практичних досліджень разом з фахівцями інженерних військ ЗС України на спеціальному полігоні в/ч А2641 підтвердили правильність обраного підходу і є підставою для проведення повномасштабної дослідно-конструкторської роботи зі створення спеціалізованого безпілотної авіаційного комплексу для оперативного виявлення мін з урахуванням радіотехнічної корекції їхнього місцезнаходження, що дасть змогу забезпечити точність визначення координат виявлених мін до 2-3 см [7].

Висновки. Як підсумок, слід зазначити, що визначення параметрів аерознімання БпЛА коптерного типу, потрібних для виявлення наземних мін із заданою імовірністю P , а також визначення і систематизація факторів і умов, які впливають на застосування безпілотного літального апарата коптерного типу під час виявлення наземних мін, дають змогу виявити особливості та обмеження щодо застосування БпЛА коптерного для виявлення мін, а також перейти до розроблення оперативно-тактичних і тактико-технічних вимог до ДОД, які встановлюються на БпЛА коптерного типу.

Подальші дослідження мають відбуватися за такими актуальними напрямками: визначення принципів формування вимог до ДОД, які встановлюються на БпЛА в інтересах виявлення мін, і обґрунтування складу вимог; визначення раціональної конфігурації ДОД на БпЛА; оброблення зображень мін з використанням “штучного інтелекту”; розроблення бібліотек сигнатур мін для різних умов аерознімання; визначення впливу типу мін, габаритів і особливостей конструкцій для їх виявлення із застосуванням БпЛА тощо.

Подяка. Дослідження проведені за підтримкою НАН України в межах Цільової науково-технічної програми оборонних досліджень НАН України на 2020–2021 рр.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Веремеев Ю. Г. Мины вчера, сегодня, завтра. Минск : Современная школа, 2008. 352 с.
2. Вороч Б. О. Шляхи вирішення проблемних питань розмінування території України. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. Київ, 2020. № 2 (69). С. 143–148.
3. Мосов С., Нероба В. Напрями застосування безпілотної авіації для виконання завдань розмінування: світовий досвід. *Збірник наукових праць військової та технічної науки НАДПСУ ім. Б. Хмельницького*. Хмельницький, 2019. № 1 (79). С. 172–185.
4. Pat. US6840480B2. Miniature, unmanned aircraft with interchangeable data module. URL: <https://patents.google.com/patent/US6840480>. (дата звернення 15.10.2021).
5. Pat. US20140062754. Remote detection, confirmation and detonation of buried improvised explosive devices. URL: <https://patents.google.com/patent/US20140062754A15>. (дата звернення 15.10.2021).
6. Кириленко В. А., Нероба В. Р. Глобальна проблема розмінування: стан і підходи до розв’язання. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. Київ, 2019. № 2 (66). С. 115–119.
7. Popov M. O., Stankevich S. A., Mosov S. P., Titarenko O. V., Topolnytskyi M. V., Dugin S. S. Landmine detection with UAV-based optical data fusion. *2021 IEEE : Proceedings of the 19th International Conference on Smart Technologies (EuroCon 2021)*. Lviv, 2021. pp. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
8. Средства разведки и преодоления минных полей. URL: <http://www.zvo.su/suhoputnyeyvoyska/sredstva-razvedki-i-preodoleniya-minnyh-poley.html>. (дата звернення 15.10.2021).
9. Коцюруба В. І., Цибуля С. А., Рибалко В. В. Обґрунтування доцільності використання способу повітряної розвідки районів інтенсивного застосування міної зброї. *Social Development and Security : electron. j. of sci. papers*. Kyiv, 2019. Vol. 9, No. 1. P. 60–68. DOI: <http://doi.org/10.33445/sds.2019.9.1.5>.
10. Мосов С., Нероба В., Селюков О. Особливості застосування безпілотного літального апарата в надзвичайних ситуаціях. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека : наук. журнал*. Київ, 2020. № 1 (9). С. 34–40.
11. Бурштинська Х. В., Станкевич С. А. Аерокосмічні знімальні системи. Львів : Львівська політехніка, 2013. 316 с.
12. Stankevich S. A., Gerda M. I. Small-size target’s automatic detection in multispectral image using equivalence principle. *Central European Researchers Journal*. 2020. Vol. 6. No. 1. P. 1–9.
13. Ребрин Ю. К. Оптико-електронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. Киев : КВВАИУ, 1988. 452 с.
14. Краснопецев Б. В. Фотограмметрия. Москва : МИИГАиК, 2008. 160 с.
15. Мосов С. П., Станкевич С. А., Слонов М. Ю. Расчеты на воздушную разведку. Киев : КИ ВВС, 1996. 316 с.
16. Paine D. P., Kiser J. D. Aerial Photography and Image Interpretation. Hoboken: John Wiley, 2012. 648 p. DOI:10.1002/9781118110997.
17. Станкевич С. А. Статистичні моделі розділення класів об’єктів аерокосмічного моніторингу за цифровими зображеннями. *Актуальні проблеми військової екології : зб. матеріалів наук.-практ. конф. / ННДЦ ОТіВБ України*. Київ, 2004. С. 76–81.
18. Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками. *Космична наука і технологія*. 2002. Т. 8, № 2/3. С. 91–113. DOI: 10.15407/knit2002.02.091.
19. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-електронных систем. *Оптический журнал*. 1998. Т. 65, № 2. С. 60–63.
20. Gimelfarb G. L. Image Textures and Gibbs Random Fields. Dordrecht : Kluwer Academic Press, 1999. 250 p.

21. Певцов Г. В., Яцуценко А. Я., Карлов Д. В., Пічугін М. Ф., Трофименко Ю. В., Чернявський О. Ю., Борцова М. В. Развитие теории обнаружения радиосигналов. Основы энергетического обнаружения. *Системы обработки информации*. 2013. Вып. 8. С. 84–94.
22. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Москва : Радио и связь, 1989. 656 с.
23. Станкевич С. А. К оценке линейного разрешения цифровых аэрокосмических снимков. *Космічна наука і технологія*. 2002. Т. 8, № 2/3. С. 103–106.
24. Станкевич С. А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень. *Космічна наука і технологія*. 2005. Т. 11, № 3/4. С. 81–84.
25. Безпілотна авіація у військовій справі: кол. монографія / С. П. Мосов, М. В. Погорельський, С. М. Салій, О. В. Селюков, А. Л. Фещенко ; за ред. проф. С. П. Мосова. Київ : Інтерсервіс, 2019. 324 с.
26. Мосов С. П., Колесніков В. О. Вимоги до вибору безпілотних авіаційних комплексів для виконання завдань розвідки та спостереження. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*. Київ, 2016. № 1 (56). С.24–28.
27. Інструкція з правил поведіння військослужбовців на місцевості, на якій є вибухонебезпечні предмети, та дотримання заходів мінної безпеки : затв. наказом ГШ ЗС України від 19.04.2018 р. № 161.
28. Нероба В. Классификация мин, как объектов разведки с помощью ТСВР БПЛА, и их опознавательные признаки. *Шекара*. 2019. № 3. С. 73–77.
29. Міхно О. Г., Шмаль С. Г. Військова топографія: підручник. Київ : Київський університет, 2008. 384 с.
30. Мосов С. Аэрокосмическая разведка в современных военных конфликтах : монография. Киев : Румб, 2008. 248 с.
31. Валецкий О. В. Минное оружие: вопросы минирования и разминирования. Москва : Крафт, 2009. 576 с.
32. Замінований Донбас: близько 16 тисяч квадратних кілометрів земель на Луганщині й Донеччині забруднені мінами та снарядами. URL: <https://armyinform.com.ua/2021/04/zaminovanyj-donbas-blyzko-16-tysyach-kvadratnyh-kilometriv-zemel-na-luganshhyini-j-donechchyni-zabrudneni-minamy-ta-snaryadamy/>. (дата звернення 15.10.2021).
33. Popov M. O., Stankevich S. A., Mosov S. P., Titarenko O. V., Topolnytskyi M. V., Dugin S. S. Landmine detection with UAV-based optical data fusion. *2021 IEEE : Proceedings of the 19th International Conference on Smart Technologies (EuroCon 2021)*. Lviv, 2021. pp. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.

Стаття надійшла до редакційної колегії 14.11.2021

Systematization of conditions and factors influencing the use of drones in the detection of landmines

Annotation

Based on the analysis of thematic publications, the article formulates a problematic issue of systematization of conditions and factors affecting unmanned aerial vehicles (hereinafter drones) and installed sensors of optical wavelength range of the electromagnetic spectrum during the detection of landmines.

The purpose of this research is to perform this task. To investigate the conditions and factors affecting on the operation of the drone and sensors installed on it. The parameters required to detect landmines with a given probability, based on the characteristics of a typical sample of landmines and the technical characteristics of sensors optical wavelength range, mounted on a drone with a set of applied mathematical models.

Determining the main parameters of aerial photography allowed to proceed to the specification and systematization of conditions and factors affecting the operation of the drone and the sensors installed on it in the optical range of wavelengths of the electromagnetic spectrum.

Such factors and conditions include:

- environmental conditions;
- season; time of day;
- external pilot qualification;
- weather conditions;
- turbulence of the atmosphere;
- the area where the mines are located;
- gusts of wind;
- means of radio signal suppression;
- vibrations of the carrier;
- means of disguising mines on the ground, etc.

Based on the results of research, conclusions are made and directions of further research are given.

Keywords: landmine; copter-type unmanned aerial vehicle; aerial imaging.