

УДК 623.3

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.2.51-62>

*Сергій Мосов, доктор військових наук, професор (ORCID: 0000-0003-0833-3187),
Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту,*

*Вадим Нероба, доктор філософії з безпеки державного кордону
(ORCID: 0000-0002-7232-3285),*

*Національна академія Державної прикордонної служби України
імені Богдана Хмельницького*

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ОБҐРУНТУВАННЯ СКЛАДУ ВИМОГ ДО ВИДОВОЇ АПАРАТУРИ РОЗВІДКИ МІН, ЩО ВСТАНОВЛЮЄТЬСЯ НА БПЛА

У статті запропоновано методичний підхід до обґрунтування складу вимог до видової апаратури розвідки наземних мін у видимому діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра, що встановлюється на безпілотний літальний апарат коптерного типу в інтересах розмінування. Розглядаються цифрові, фотографічні та багатозональні фотографічні камери.

Метою статті обрано розроблення методичного підходу та обґрунтування з його використанням складу вимог до видової апаратури розвідки мін, що встановлюється на борту безпілотного літального апарату.

В основу методичного підходу покладено модель сигнатур мін і сукупність специфічних принципів, до складу яких запропоновано: принцип «модуляції», принцип «адаптації», принцип «цілеспрямованої поведінки», принцип «зовнішньої турбулентності», принцип «внутрішнього опору», принцип «рухливості ситуації», принцип «здатності до прогнозування» і принцип «єдності частин у цілому». Це дозволило з урахуванням взаємопов'язаних параметрів видової апаратури розвідки мін сформуванню необхідну сукупність вимог щодо висот ведення повітряної розвідки мін, розміру пікселя матриці (просторова розрізненість) видової апаратури розвідки мін, контрасту за яскравістю міна/фон, фокусної відстані та світлосили об'єктиву видової апаратури розвідки мін, радіометричної розрізненості, спектральної розрізненості та ваги видової апаратури розвідки. В якості основного показника обрано імовірність виконання завдання розвідки мінної обстановки (мін) видовою апаратурою розвідки у видимому діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра, який встановлюється на безпілотний літальний апарат.

Напрямами подальших досліджень слід вважати створення спектральної бібліотек з даними про кожну міну в інтересах повного використання можливостей гіперспектральної зйомки для розвідки наземних мін, а також розробку вимог до видової розвідувальної апаратури безпілотного літального апарату для розвідки морських мін.

Ключові слова: міна, розвідка мін, безпілотний літальний апарат.

Постановка проблеми. На теперішній час потреба в розмінуванні в Україні вже досягла сотні тисяч квадратних кілометрів потенційно-небезпечної території та продовжує кожний день зростати внаслідок війни. Згідно спільного міжвідомчого наказу «Про організацію робіт з виявлення, знешкодження та знищення вибухонебезпечних предметів на території України та взаємодію під час їх виконання» [1] основне навантаження з розмінування (виявлення, знешкодження та знищення) вибухонебезпечних предметів (далі – ВВП), що залишаються на території України після війн, сучасних боєприпасів і підривних засобів (крім вибухових пристроїв, що використовуються у терористичних цілях) покладається на підрозділи Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту в складі ДСНС.

Враховуючи великі розміри забруднених і небезпечних для життєдіяльності територій, нагальною потребою для України є застосування більш сучасних та ефективних технічних засобів і способів виявлення наземних мін і ВВП [2].

На теперішній час у світі активно розвивається безпілотна авіація, яка може покращити ситуацію щодо розв'язання проблеми розмінування територій від різноманітних мін і ВВП. Разом з тим, актуальний напрям застосування БпЛА для ведення розвідки мін і ВВП є трендовим у світі та залишається на стадії як дослідження, так і проблемного питання щодо розробки методичного підходу до формування системних вимог до видової (прим. з формуванням зображення) апаратури розвідки мін і ВВП у видимому діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра. Такі дослідження на теперішній час виконуються в таких провідних країн світу, як США, Велика Британія, Ізраїль, Швейцарія та ін.

Зазначена проблема має місце і в Україні, що вимагає знаходження підходу до її розв'язання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різними за змістом питаннями, пов'язаними з дослідженнями щодо проблематики застосування БпЛА для вирішення завдань розвідки різноманітних військових об'єктів, у тому числі мін, займалася низка українських та іноземних фахівців і вчених. Отже, у колективній праці [3] пропонується комплексувати засоби інженерної розвідки з БпЛА при виконанні завдань виявлення мінно-вибухових загороджень і подальшого розмінування. На саме ці дослідження посилаються автори у [4]. Аналогічний підхід до ведення інженерної розвідки з використанням БпЛА викладений у [5]. У низці джерел з мережі Інтернет [6-9] наведена інформація про можливі варіанти використання БпЛА коптерного типу для ведення розвідки мін і ВВП. Інформацію про розробку в США БпЛА з металодетектором для пошуку мін як на суші, так і на морі, наведено у [10]. Дослідний зразок удосконаленого квадрокоптера, створеного на базі БпЛА InstantEye Mk2 Gen3, обладнаний двома магнітометрами. Розробники припускають, що новий безпілотник буде виявляти місцезнаходження міни і передавати її координати саперам. Авторський колектив у [11] акцентує увагу на міжнародному досвіді застосування БпЛА для розмінування. У праці [12] автори систематизували умови і фактори, що впливають на застосування безпілотного літального апарата коптерного типу при виявленні наземних мін. У колективній праці [13] запропоновано підхід до виявлення мін способом поєднання видових даних оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектру на основі БпЛА.

Разом з цим, питання розробки методичного підходу до формування на системних засадах вимог до видової апаратури розвідки (далі – ВАР) мін у видимому діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра, які встановлюються на БпЛА, залишаються в арсеналі актуальних і потребують проведення окремих досліджень.

Мета статті. Розробити методичний підхід та обґрунтувати з його використанням склад вимог до видової апаратури розвідки мін, що встановлюється на борту БпЛА.

Виклад основного матеріалу дослідження. Виходячи з принципу «модуляції», необхідно формалізувати процес модуляції оптичного сигналу, що поступає на ВАР БпЛА від міни (місця розташування міни). Результируюча функція передавання модуляції (далі – ФПМ) вихідного сигналу $T_{\Sigma}(N)$ у загальному вигляді може бути представлена таким чином:

$$T_{\Sigma}(N) = kT_{\text{тур}}(N)T_{\text{зс}}(N)T_{\text{аб}}(N)T_{\text{диф}}(N)T_{\text{деф}}(N)T_{\text{фн}}(N), \quad (1)$$

де k – контраст за яскравістю об'єкт/фон; $T_{\text{тур}}(N)$ – ФПМ, що відображає вплив

турбулентності атмосфери для видимого діапазону довжин хвиль електромагнітного спектру; $T_{\text{зс}}(N)$ – ФПМ, що відображає вплив зсуву зображення міни (місця розташування міни); $T_{\text{аб}}(N)$ – ФПМ, що відображає вплив аберацій оптичної системи (далі – ОС); $T_{\text{диф}}(N)$ – ФПМ, що відображає вплив дифракції ОС; $T_{\text{деф}}(N)$ – ФПМ, що враховує дефокусування ОС; $T_{\text{фн}}(N)$ – ФПМ, що відображає вплив фотоприймача; N – просторова частота.

ФПМ, що відображає вплив турбулентності атмосфери, може бути визначена за наближеною формулою [14]:

$$T_{mup}(N) \approx \exp(-2\pi^2 \sigma_T^2 f^2 N^2), \quad (2)$$

де σ_T – константа, що характеризує вплив турбулентності атмосфери.

Аналіз умов застосування ВАР БпЛА коптерного типу при виконанні завдань розвідки, у тому числі мін [15], показує, що розвідка мін, як малорозмірних об'єктів, буде здійснюватися з невеликих висот (1-10 м). У зв'язку з цим, будемо вважати, що $T_{mup}(N) = 1$.

Вплив зсуву зображення міни (місця розташування міни) у фокальній площині може відбуватися за умов великих швидкостей польоту БпЛА, що характерно для реактивної розвідувальної авіації. Враховуючи, що БпЛА коптерного типу мають невеликі швидкості польоту, приймаємо $T_{zs}(N) = 1$.

Сучасні ОС, що встановлюються на ВАР БпЛА, фактично не мають похибки зображення в ОС, що викликається відхиленням променя від того напрямку, яким він мав би йти в ідеальній ОС, тобто абераций, або вони такі мінімальні, що можна ними знехтувати. Тому можна прийняти $T_{ab}(N) = 1$.

ФПМ, що обумовлена дифракцією світлової хвилі на вхідній зіниці ОС у фокальній площині, може бути визначена за наближеною формулою для середньої довжини хвилі видимого діапазону електромагнітного спектра [16]:

$$T_{diff}(N) = 1 - 7,510^{-4} \frac{f}{d} N, \quad (3)$$

де d – діаметр вхідної зіниці об'єктиву.

Враховуючи відсутність у сучасній ВАР БпЛА дефокусування за умов їх розміщення на стабілізованій платформі на борту БпЛА, величину ФПМ, що враховує дефокусування ОС, приймаємо такою, що рівна одиниці: $T_{def}(N) = 1$.

Формула для розрахунку ФПМ одного елемента дискретного фотоприймача має такий вигляд [16]:

$$T_{fn}(N) = \frac{\sin(\pi 2\Delta N)}{\pi 2\Delta N}, \quad (4)$$

де Δ – лінійний розмір пікселя (одного елемента) дискретного фотоприймача у фокальній площині.

З урахуванням вищенаведеного вираз для результуючої ФПМ буде таким:

$$T_{\Sigma}(N) = k T_{diff}(N) T_{fn}(N). \quad (5)$$

За умов припущення щодо максимального значення контрасту об'єкт/фон, тобто $k=1$, вираз (5) переписеться у вигляді:

$$T_{\Sigma}(N) = T_{diff}(N) T_{fn}(N). \quad (6)$$

Підбиваючи підсумок, слід зазначити, що основний моделюючий вплив на сигнал будуть здійснювати два фактори: дифракція ОС і дискретний фотоприймач ВАР БпЛА.

При цьому, модуляція оптичного сигналу, що поступає від міни (місця розташування міни) на ВАР БпЛА, враховуючи (3) і (4), буде безпосередньо залежати від розміру Δ пікселя (одного елемента) дискретного фотоприймача у фокальній площині.

Зрозумілим є те, що висота H ведення розвідки впливає на вихідний оптичний сигнал, що пов'язано з його можливим розсіюванням атмосферою. У випадку квадрокоптера невеликі висоти його застосування не будуть значно впливати на зміну енергетичного рівня оптичного сигналу. Разом з тим, висота повітряної розвідки впливає на імовірність P_3 виявлення та розпізнавання мін [16, 17]:

$$P_3 = \exp \left[- \left(\frac{1,1H\Delta}{(l/b)f\sqrt{k}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

де l – лінійний розмір міни.

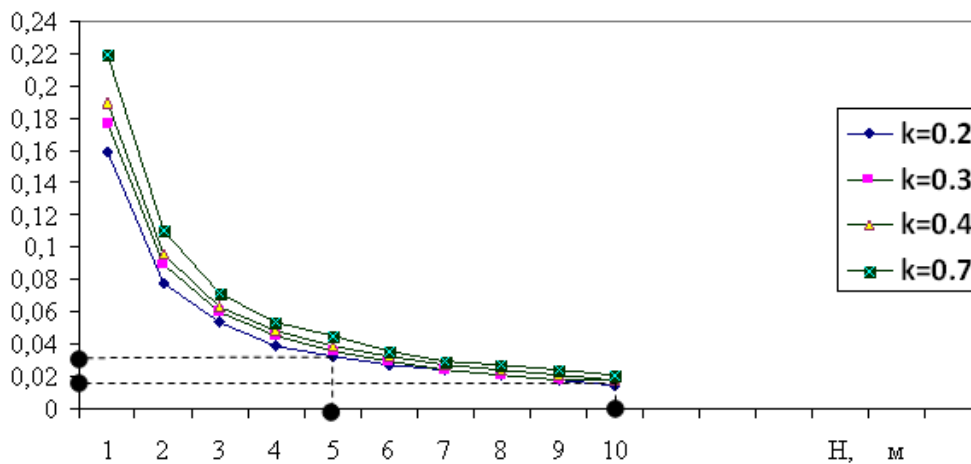
Змінними складовими для ВАР БпЛА, виходячи з (7), є: H, f і k . Змінність величини фокусної відстані f буде визначатися наявністю оптичного зуму у ВАР БпЛА. У цьому випадку можна змінювати величину масштабу m зображення міни (контур міни) шляхом зміни як H , так і f . Незмінними величинами слід вважати Δ і l .

При визначенні ВАР БпЛА для виконання розвідки мінної обстановки співвідношення зазначених вище складових має забезпечити виконання умови: $P_3 > 0,7$ [17, 18].

Розрахунки, проведені по (7) з використанням даних такої цифрової камери, як senseFly S.O.D.A, призначеної для установки на БпЛА: діаметр l міни ПМН-2 = 120 мм; коефіцієнт форми $b=1,36$; $f=9$ мм; $k=0,7$; $P_3=0,9$; розмір пікселя $\Delta=2,3$ мкм, показали, що виявити та розпізнати, наприклад, протипіхотну міну ПМН-2 можна в незамаскованому вигляді на місцевості (ідеальний варіант) навіть із висоти $H=100$ м. При цьому поперечне захоплення Z цифрової камери на місцевості при куті її поля зору $2\beta=64^\circ$ і буде складати 132 м.

В умовах маскуваності мін і забезпечення прихованості повітряної розвідки мінної обстановки (мін) від противника ведення розвідки доцільно здійснювати на висотах до 10 м.

Розрахунки, проведені по (7) для умов: діаметр l міни ПМН-2 = 120 мм; коефіцієнт форми $b=1,36$; $P_3=0,9$; $H=10$ м і 5 м; $k=0,7$ і $f=10$ мм, показали потрібні розміри пікселя: $\Delta_{10}=0,021$ мм, $\Delta_5=0,043$ мм (рис. 1).



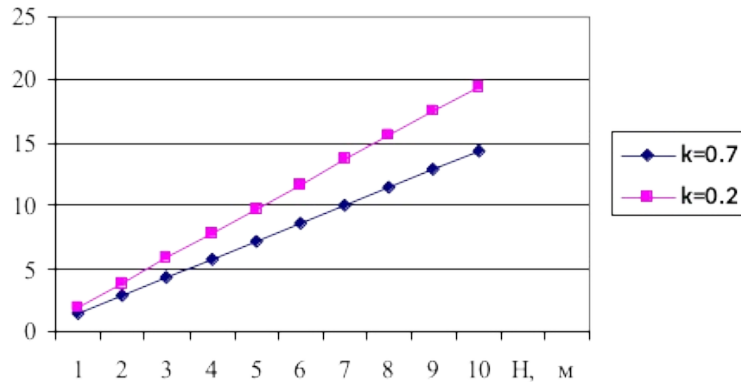
Примітка. Діаметр l міни ПМН-2 = 120 мм; $b=1,36$; $P_3=0,9$; $f=10$ мм.

Рисунок 1 – Графіки, що характеризують необхідний розмір пікселя Δ дискретного фотоприймача ВАР БпЛА від висоти ведення розвідки H для умов $P_3=0,9$ при контрастах $k \geq 0,2$

Сучасні аерофотокамери для БпЛА мають розміри одного пікселя матриці в діапазоні: $0,0051 \div 0,0022$ мм, що менше величини розрахованого розміру пікселя зі значним запасом.

Якщо розглядати протитанкову міну, наприклад ТМ-62М, то її діаметр перевищує діаметр міни ПМН-2 майже в три рази, а можливості вище наведених ВАР БпЛА щодо виявлення та розпізнавання міни ТМ-62М, природно, пропорційно більші, ніж міни ПМН-2.

На рис.2 наведено графіки розрахунку можливостей аерофотокамери Zenmuse Z30 на платформі квадрокоптера Matrice200 SeriesV2 щодо граничних лінійних розмірів l міни (іншого об'єкту) для умов $P_3 = 0,9$ при різних контрастах $k \geq 0,2$. Аналіз показує, що застосування аерофотокамери Zenmuse Z30 забезпечить вирішення завдання щодо виявлення та розпізнавання протипіхотної міни ПМН-2 з діаметром $l = 120$ мм з висот $H \leq 10$ м до типу за відсутності маскуваня. За умов маскуваня Zenmuse Z30 забезпечить виявлення контуру міни ПМН-2 при $k \geq 0,2$.



Примітка. Розмір пікселя $\Delta = 0,0028$ мм; $b=1,36$; $P_3 = 0,9$; $f = 10$ мм.

Рисунок 2 – Графіки, що характеризують лінійний розмір l міни (діаметр) від висоти ведення розвідки H із застосуванням цифрової аерофотокамери Zenmuse Z30 для умов $P_3 = 0,9$ при контрастах $k \geq 0,2$

Важливою характеристикою для ВАР БпЛА слід вважати радіометричну розрізненість (пов'язане з яскравістю), яка визначається кількістю градацій значень кольору, які відповідають переходу від яскравості абсолютно «чорного» до абсолютно «білого», і виражається в кількості біт на піксель зображення [19]. Це означає, що в разі радіометричної розрізненості 6 біт на піксель буде всього 64 градації кольору ($2^6 = 64$); у разі 8 біт на піксель (формат JPEG) – 256 градацій ($2^8 = 256$), 10 біт на піксель – 1024 градацій ($2^{10} = 1024$), 16 біт на піксель (формат RAW) – 65536 градацій ($2^{16}=65536$). При цьому слід підкреслити, що розташування пікселів описує просторову структуру зображення, а радіометричні характеристики описують фактичний зміст інформації в зображенні: чим більше бітова глибина кольору, тим більше деталей і градацій відтінків можна отримати на цифровому знімку, особливо це стосується затінених і яскравих деталей.

Аерофотокамера Zenmuse Z30 має, згідно з її технічними характеристиками, радіометричну розрізненість 8 біт (формат JPEG), а аерофотокамера Nikon P7000 має радіометричну розрізненість 16 біт (формат RAW). Людське око, за умов тренування, здатне розрізняти біля 10 млн кольорів [20]. У форматі JPEG формується 16,8 млн кольорів, а у форматі RAW – 281 трлн кольорів.

Підбиваючи підсумок щодо результатів дослідження цифрових аерофотокамер, до складу вимог до ВАР БпЛА у видимому діапазоні довжин хвиль ($\lambda=0,38\div 0,76$) для ведення повітряної розвідки мін слід віднести (рис. 3): розмір пікселя матриці $\Delta \leq 0,005$ мм; фокусну відстань $f \geq 10$ мм для висоти повітряної розвідки $H \leq 10$ м; оптичний зум; світлосилу об'єктиву – не гірше 1:2,8; радіометричну розрізненість – $8\div 16$ біт; вагу – до 600 г.

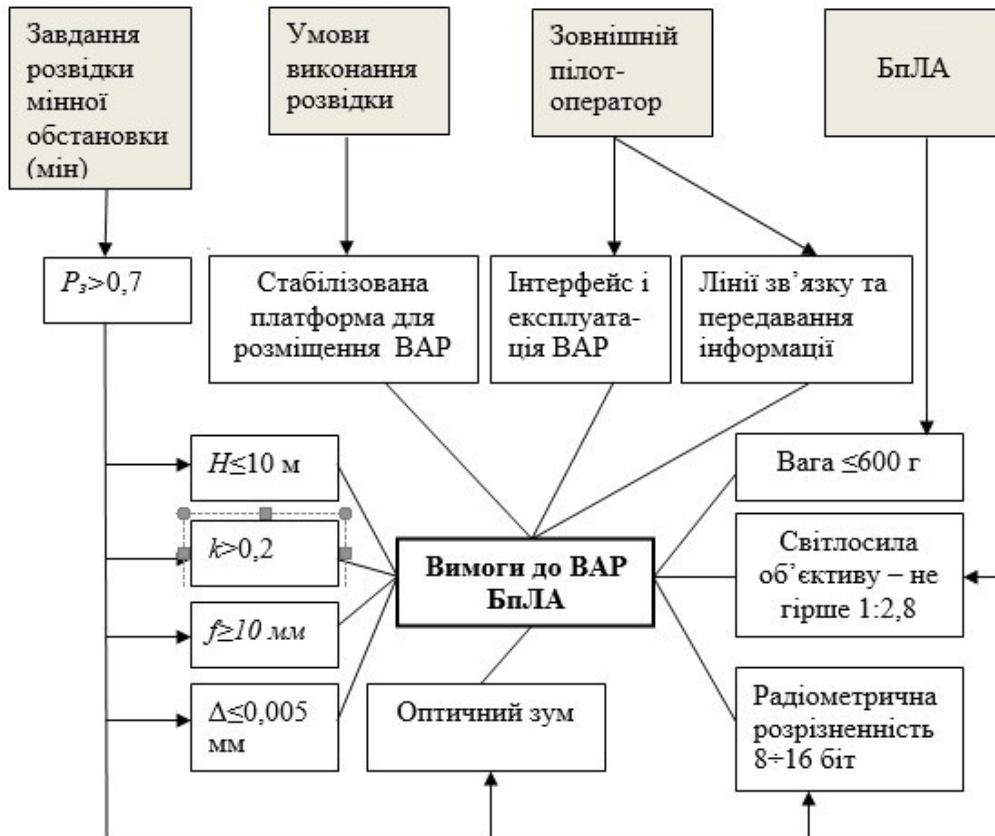


Рисунок 3 – Схема методики формування сукупності вимог до цифрових фотокамер, що встановлюються на БПЛА для виявлення наземних мін

ВАР

Для забезпечення максимального контрасту за яскравістю міна/фон у сучасних умовах активно застосовується спектральнона аерозйомка у видимому діапазоні довжин хвиль λ електромагнітного спектру, коли відбувається одночасне отримання цифрових знімків об'єкту в різних зонах видимого діапазону. Дійсно, спектральні характеристики мін фактично є їх розпізнавальною ознакою, у зв'язку з чим потік енергії необхідно реєструвати в тому діапазоні, який найбільш різко відокремлює досліджувану(ні) міну(ни), тобто там, де він (вони) має(ють) специфічну спектральну яскравість.

У цьому випадку вираз (7) буде мати такий вигляд:

$$P_{z\lambda} = \exp \left[- \left(\frac{1,1H\Delta}{(l/b)f^4\sqrt{k_\lambda}} \right)^2 \right], \quad (8)$$

де k_λ – контраст за яскравістю міна/фон для довжини хвилі λ .

Криві спектральної яскравості мін для різних атмосферних умов, пори року, часу доби й умов освітлення треба брати з відповідної спеціальної спектральної бібліотеки, що має бути заздалегідь створена.

Використання спектральних моделей сигнатур мін Q_m :

$$Q_m = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (9)$$

$$X_k = I(i, j, k),$$

де X_k – двовимірне зображення міни (контуру міни) в матриці розміром $i \times j$ k -го спектрального каналу в діапазоні довжин хвиль λ електромагнітного спектру; I – величина

спектральної яскравості пікселя; i, j – координати пікселя в матриці ($i = \{1, z\}$) – номер строки матриці; $j = \{1, s\}$ – номер стовпця матриці; $k = \{1, n\}$ – номер спектрального каналу реєстрації міни, дозволить за умов застосування спектральної зйомки визначати такі спектральні інформаційні канали, використання яких забезпечить максимум контрасту на цифровому аерознімку між міною (контуром міни) та ландшафтом, на якому вона розташована [18, 21]. Завдяки спектральному контрасту за умов недостатньої просторової розрізненості ВАР БпЛА виявлення міни (контуру міни) буде відбуватися із використанням комп'ютерної обробки шляхом зіставлення отриманої спектральної характеристики міни (контуру міни) з еталонною, що знаходиться в спектральній бібліотеці.

Спектральна зйомка з використанням видової апаратури, що встановлюється на БпЛА, на теперішній час активно застосовується в різних галузях. Вона дозволяє виявляти об'єкти по їх фізико-хімічному складу, ідентифікувати видовий склад і стан рослинного покриву, визначати геологічну структуру, виявляти хімічний склад води і багато іншого.

Спектральна зйомка, що виконується с використанням до 10 вузьких знімальних зон, вважається мультиспектральною, а за умов більшої кількості числа знімальних зон – гіперспектральною. Мультиспектральний знімок представлений серією зональних зображень, які розрізняються залежно від особливостей спектральної яскравості об'єктів зйомки.

При гіперспектральній зйомці збільшується можливість виділення об'єктів, що характеризуються наявністю смуг поглинання. Гіперспектральна зйомка дозволяє, при високій спектральній розрізненості (0,1÷10 нм), отримувати інформацію, яка відсутня на традиційних панхроматичних і мультиспектральних знімках. Наявність вузьких спектральних зон як у видимому діапазоні довжин хвиль, так і в ближньому та середньому інфрачервоних діапазонах, дозволяють створювати більш інформативні характеристики (профілі) для об'єктів, що розвідуються.

Робота з дуже великою кількістю знімальних зон гіперспектральних знімків, утруднена, тому по ним створюються так звані індексні зображення на основі розрахунку спеціально обраних спектральних індексів, що сприяє виділенню певного типу об'єктів (вегетатійні індекси для дешифрування властивостей рослинності, індекс вологості ґрунтів, засніженості території, концентрації фітопланктону та ін.).

На теперішній час актуальними і затребуваними для здійснення збору просторових даних стають гіперспектральні технології. За оцінками експертів, до 70 % всіх завдань зондування Землі можна вирішити шляхом використання результатів зйомки з високою спектральною розрізненістю, і тільки 30 % – за допомогою видової інформації з високою просторовою розрізненістю. При цьому слід зазначити, що на відміну від звичайних аерофотокамер спектральні аерофотокамери крім просторової та радіометричної розрізненості мають ще одну характеристику – спектральну розрізненість, під якою слід розуміти найменшу різницю частот сигналів електромагнітного випромінювання, що надходить від об'єкта зондування, яку може розрізнити технічний засіб дистанційного зондування Землі.

Для виконання умов виявлення та розпізнавання міни ПМН-2 $P_3 = 0,9$ при контрасті $k = 0,7$ визначено потрібні розміри пікселя для висот 10 м і 5 м: $\Delta_{10} = 0,021$ мм і $\Delta_5 = 0,043$ мм.

Враховуючи особливості й переваги мультиспектральної та гіперспектральної зйомки, слід звернути увагу на те, що вони не забезпечують оперативність зйомки і можуть бути використані під час попередньої розвідки мінної обстановки та існуючих мінних полів, тому що отримувані цифрові аерознімки мають значний об'єм і потребують відповідного часу для їхньої комп'ютерної обробки з використанням спеціального програмного забезпечення (ERDAS, ENVI, EXPRESSO 13 та ін.).

Підбиваючи підсумок щодо результатів дослідження цифрових спектральнозональних аерофотокамер, до складу вимог до спектральнозональних ВАР БпЛА для ведення повітряної розвідки мін слід віднести (рис. 4): розмір пікселя матриці $\Delta \leq 0,006$ мм (6 мкм); фокусну відстань $f \geq 10$ мм для висоти повітряної розвідки $H \leq 10$ м; світлосилу об'єктиву – не гірше 1:2,8; радіометричну розрізненість – 8÷16 біт; спектральну розрізненість – 5÷10 нм; вагу – до 600 г.

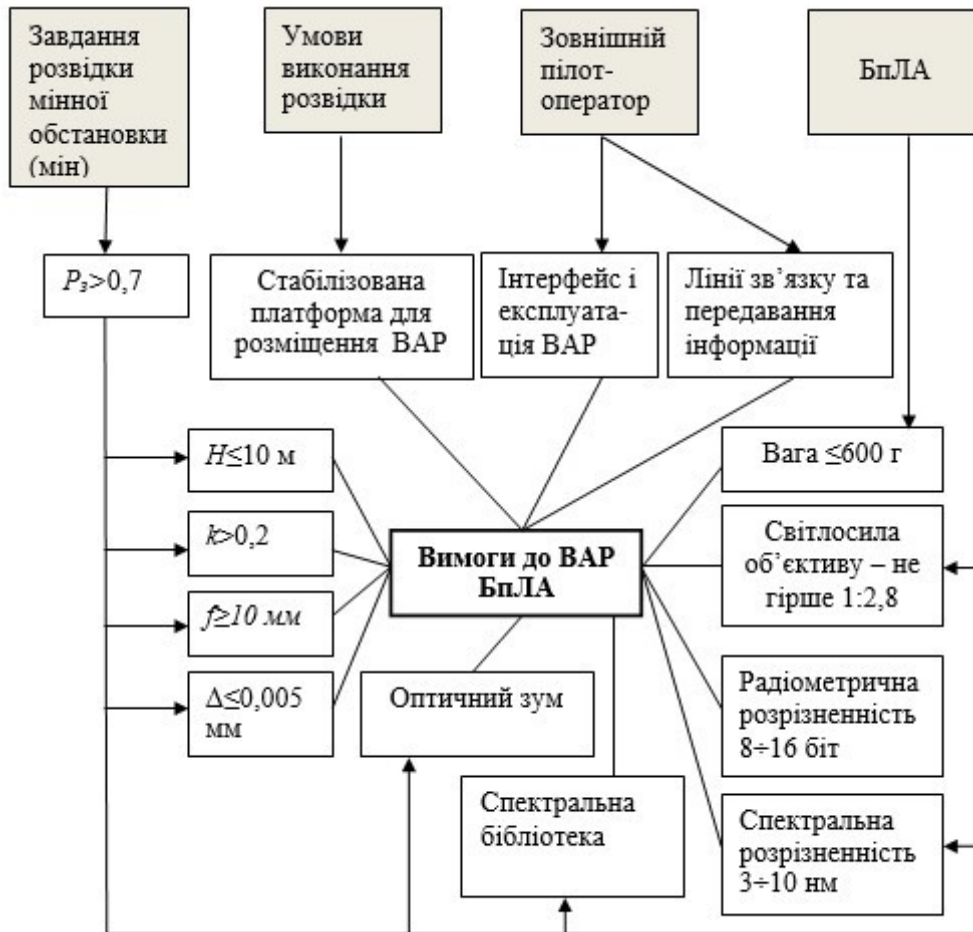


Рисунок 4 – Схема методики формування сукупності вимог до багатозональних цифрових фотокамер, що встановлюються на БпЛА

Реалізація принципу «адаптації» безпосередньо не пов'язана з функціонуванням ВАР БпЛА, як технічних засобів. Це, у першу чергу, пов'язано з управлінням з боку зовнішнього пілота-оператора функціонуванням БпЛА та ВАР з використанням спеціальних тактичних прийомів, що відбувається через лінії зв'язку в умовах впливу різноманітних факторів [12]: метеоумови; вібрації БпЛА; температурний режим польоту, прискорення вітру тощо, а також наявністю стабілізованої платформи, на яку встановлюється ВАР на борту БпЛА. У зв'язку з цим технічні характеристики ВАР БпЛА (оптичний зум, захоплення на місцевості об'єктиву ВАР, розміри елемента цифрового фотоприймача), мають забезпечувати зовнішньому пілоту-оператору ведення розвідки мінної обстановки з високою ймовірністю виконання завдання під час зміни параметрів польоту БпЛА.

Впровадження принципу «цілеспрямованої поведінки» стосовно забезпечення функціонування ВАР БпЛА щодо розвідки мінної обстановки вимагає оперативного надходження контрольної інформації з борту БпЛА та ВАР БпЛА зовнішньому пілоту-оператору у відповідні моменти часу для оперативного аналізу та визначення їхніх подальших дій з управління та експлуатації БпЛА або застосування ВАР БпЛА. Для цього на БпЛА має існувати відповідна система дистанційного управління польотом БпЛА і застосуванням ВАР БпЛА: електронні регулятори швидкості, польотні контролери, приймачі радіосигналів, програмне забезпечення тощо [22]. У зв'язку з цим ВАР БпЛА має бути технічно пов'язаний з усіма сигналами з БпЛА.

Реалізація принципів «зовнішньої турбулентності», «внутрішнього опору» і «рухливості ситуації» пов'язана з вимогами врахування як позитивних, так і негативних змін, що відбуваються в зовнішньому і внутрішньому середовищі стосовно БпЛА і ВАР

БпЛА, так і відповідними реакціями на них з боку зовнішнього пілота-оператора ВАР: забезпечення стійкості управління польотом БпЛА з посиленням швидкості вітру, управління застосуванням ВАР БпЛА із збільшенням турбулентності атмосфери, попадання мін в фокальну площину ВАР БпЛА тощо. У зазначених умовах технічні характеристики ВАР БпЛА мають забезпечувати виконання завдання не гірше $P_3 \geq 0,7$.

Реалізація принципу «здатності до прогнозування» пов'язана з вимогою обов'язкового попереднього вивчення зовнішнім пілотом-оператором ВАР місцевості за наявними космічними чи авіаційними знімками, топографічними картами відповідного масштабу і, за попередніми даними інженерної розвідки, можливої мінної обстановки, наявних бібліотек спектральних сигнатур мін, що будуть розвідуватися, і в результаті цього – прогнозування ефективних спектральних зон електромагнітного спектра щодо застосування багатозональних ВАР БпЛА під час розвідки мінної обстановки для досягнення потрібної (максимальної) величини P_3 .

З метою реалізації принципу «єдності частин у цілому» в системі БпЛА-пілот-оператор ВАР має бути виконана вимога щодо забезпечення ефективного технічного взаємозв'язку між складовими системи, а також технічного забезпечення експлуатації ВАР як системи (діагностика; обслуговування; дрібний, середній і заводський ремонт тощо).

Підбиваючи підсумок щодо результатів дослідження цифрових аерофотокамер, до складу об'єднаних вимог до ВТЗР БпЛА для ведення повітряної розвідки мін слід віднести: розмір пікселя матриці $\Delta \leq 0,006$ мм; фокусну відстань $f \geq 10$ мм для висоти повітряної розвідки $H \leq 10$ м; оптичний зум; світлосилу об'єктиву – не гірше 1:2,8; радіометричну розрізненість – $8 \div 16$ біт; спектральну розрізненість – $5 \div 10$ нм; вага – до 600 г.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Використання запропонованого методичного підходу дозволить сформулювати вимоги до ВАР БпЛА з метою подальшого вибору ВАР у видимому діапазоні довжин хвиль електромагнітного спектра, які плануються для встановлення на БпЛА. Напрямок подальших досліджень слід вважати створення спектральної бібліотеки з даними про кожну міну в інтересах повного використання можливостей гіперспектральної зйомки для розвідки мін.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Наказ «Про організацію робіт з виявлення, знешкодження та знищення вибухонебезпечних предметів на території України та взаємодію під час їх виконання» № 405/223/625/455 від 27.05.2008. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0591-08#Text> (дата звернення: 01.06.2022).
2. Горбулін В., Мосов С. Наслідки мінних війн: український зріз. *Оборонний вісник*. 2021. № 11. С. 16-23.
3. Селивончик Н. М., Тамело В. Ф. Развитие технологии ведения инженерной разведки. *Новости науки и технологий*. 2010. №3 (16). С. 40-43.
4. Коцюруба В., Цибуля С., Рибалко В. Обґрунтування доцільності використання способу повітряної розвідки районів інтенсивного застосування мінної зброї. *Social development & Security*. 2019. № 1. Vol. 9. P.60-68.
5. Иркалиев И. М., Павлюков Г. М. Зональный способ ведения инженерной разведки. *Военная мысль*. 2010. №1. С. 47-52.
6. Котов М. Беспилотник научили искать противопехотные мины. URL: https://life.ru/t/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0/401262/biespilotnik_nauchili_iskat_protivopiekhotnyie_miny (дата звернення: 01.06.2022).
7. Drones with cameras learned to find dangerous mines-butterfly. URL: <https://24-my.info/drones-with-cameras-learned-to-find-dangerous-mines-butterfly/> (дата звернення: 01.06.2022).
8. [Mine Kafon Drone](https://www.kickstarter.com/projects/massoudhassani/mine-kafon-drone). URL: <https://www.kickstarter.com/projects/massoudhassani/mine-kafon-drone> (дата звернення: 01.06.2022).

9. Израильская компания продемонстрировала беспилотник, умеющий выявлять взрывчатку.. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/aktsii-protesta-kieve-politsii-nazvali-kolichestvo-1479207958.html> (дата звернення: 01.06.2022).

10. ВМС США разработали БЛА с металлодетектором. URL: <https://warspot.ru/1676-vms-ssha-razrabotali-bla-s-metallodetektoromot.ru/1676-vms-ssha-razrabotali-bla-s-metallodetektorom> (дата звернення: 01.06.2022).

11. Мосов С. П., Єременко С. А. Дрон розвідує мінну обстановку. *Пожежна та техногенна безпека*. 2020. №9(84). С.18-20.

12. Мосов С. П., Станкевич С. А., Ворович В. О. Систематизація умов і факторів, що впливають на застосування безпілотного літального апарата коптерного типу при виявленні наземних мін. *Зб. наук. праць ЦВСД НУОУ*. Вип. № 3(73). 2021. С.82-89.

13. 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. Proceedings of the 19th International Conference on Smart Technologies (EuroCon 2021). Lviv: IEEE, 2021, pp. 175-178. DOI: 10.1109/EU-CON52738.2021.9535553.

14. Фризер Х. Фотографическая регистрация информации; пер. с нем.; под ред. д.т.н. К. В. Вендровского. Москва: Мир, 1978. 670 с.

15. Безпілотна авіація у військовій справі: кол. монографія / С. П. Мосов, М. В. Погорецький, С. М. Салій, О. В. Селюков, А. Л. Фещенко; за ред. проф. С. П. Мосова. Київ: Інтерсервіс, 2019. 324 с.

16. 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.

17. Ребрин Ю. К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов: учебник. Киев: КВВАИУ, 1988. 450 с.

18. Вельцер В. Аэроснимки в военном деле; пер. с нем. Л. А. Молчановой. Москва: Воениздат, 1990. 288 с.

19. **Radiometric resolution.** URL: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/satellites-sensors/radiometric-resolution/9379> (дата звернення: 01.06.2022).

20. Разница между изображениями 8 bit и 16 bit. URL: <https://photoshop-master.ru/lessons/practice/raznitsa-mejdu-izobrajeniyami-8-bit-i-16bit.html> (дата звернення: 01.06.2022).

21. Меньшаков Ю. К. Основы защиты от технических разведок: учебное пособие; под общ. ред. М. П. Сычева. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 478 с.

22. Baichtal J. **Building Your Own Drones: A Beginners' Guide to Drones.** Que Publishing, 2015. 272 p.

REFERENCES

1. Nakaz «Pro orhanizatsiyu robit z vyyavlennya, zneshkodzhennya ta znyschennya vybukhonebezpechnykh predmetiv na terytoriyi Ukrayiny ta vzayemodiyu pid chas yikh vykonannya» № 405/223/625/455 vid 27.05.2008. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0591-08#Text>.

2. Horbulin V., Mosov S. Naslidky minnykh viyn: ukrayins'kyy zriz. *Oboronnyy visnyk*. 2021.

3. Selivonchik N. M., Tamelo V. F. Razvitiye tekhnologii vedeniya inzhenernoy razvedki. *Novosti nauki i tekhnologii*. 2010. №3 (16). S. 40-43.

4. Kotsyuruba V., Tsybulya S., Rybalko V. Obgruntuvannya dotsil'nosti vykorystannya sposobu povitryanoyi rozvidky rayoniv intensyvnoho zastosuvannya minnoyi zbroyi. *Social development & Security*. 2019. № 1. Vol. 9. R.60-68.

5. Irkaliyev I. M., Pavlyukov G. M. Zonal'nyy sposob vedeniya inzhenernoy razvedki. *Voyennaya mysl'*. 2010. №1. S. 47-52.

6. Kotov M. *Bespilotnik nauchili iskat' protivopekhotnyye miny*. URL: https://life.ru/t/%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0/401262/biespilotnik_nauchili_iskat_protivopiekhotnyye_miny.
7. *Drones with cameras learned to find dangerous mines-butterfly*. URL: <https://24-my.info/drones-with-cameras-learned-to-find-dangerous-mines-butterfly/>.
8. [Mine Kafon Drone](https://www.kickstarter.com/projects/massoudhassani/mine-kafon-drone). URL: <https://www.kickstarter.com/projects/massoudhassani/mine-kafon-drone>.
9. *Izrail'skaya kompaniya prodemonstrovala bespilotnik, umeyushchiy vyyavlyat' vzryvchatku*. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/aktsii-protesta-kieve-politsii-nazvali-kolichestvo-1479207958.html>.
10. *VMS SSHA razrabotali BLA s metallodetektorom*. URL: <https://warspot.ru/1676-vms-ssha-razrabotali-bla-s-metallodetektorom>.
11. Mosov S. P., Yeremenko S. A. *Dron rozviduye minnu obstanovku. Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka*. 2020. №9(84). S.18-20.
12. Mosov S. P., Stankevych S. A., Vorovych V. O. *Systematyzatsiya umov i faktoriv, shcho vplyvayut' na zastosuvannya bezpilotnoho lital'noho aparata kopternoho typu pry vyyavleni nazemnykh min*. Zb. nauk. prats' TSVSD NUOU. Vyp. № 3(73). 2021. S.82-89.
13. 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*. Proceedings of the 19th International Conference on Smart Technologies (EuroCon 2021). Lviv: IEEE, 2021, pp. 175-178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
14. Frizer KH. *Fotograficheskaya registratsiya informatsii*; per. s nem.; pod. red. d.t.n. K. V. Vendrovskogo. Moskva: Mir, 1978. 670 s.
15. *Bezpilotna aviatsiya u viys'koviy spravi: kol. monohrafiya* / S. P. Mosov, M. V. Pohorets'kyi, S.M. Saliy, O.V. Syelyukov, A.L. Feshchenko; za red. prof. S.P. Mosova. Kyiv: Interservis, 2019. 324 s.
16. Kononov V. I. *Obosnovaniye metodiki opredeleniya razresheniya na mestnosti aerokosmicheskikh sistem s diskretnymi fotopriyemnikami*. Kosmichna nauka i tekhnologiya. 2002. T.8. №2/3. S. 91-113.
17. Rebrin YU. K. *Optiko-elektronnoye razvedyvatel'noye oborudovaniye letatel'nykh apparatov: uchebnik*. Kiyev: KVVAIU, 1988. 450 s.
18. Vel'tser V. *Aerosnimki v voyennom dele*; per. s nem. L. A. Molchanovoy. Moskva: Voenizdat, 1990. 288 s.
19. **Radiometric resolution**. URL: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/satellites-sensors/radiometric-resolution/9379>.
20. **Raznitsa mezhdru izobrazheniyami 8 bit i 16 bit**. URL: <https://photoshop-master.ru/lessons/practice/raznitsa-mejdu-izobrajeniyami-8-bit-i-16bit.html>.
21. Men'shakov YU. K. *Osnovy zashchity ot tekhnicheskikh razvedok: uchebnoye posobiye*; pod obshch. red. M. P. Sycheva. Moskva: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2011. 478 s.
22. Baichtal J. **Building Your Own Drones: A Beginners' Guide to Drones**. Que Publishing, 2015. 272 p.

*Sergii Mosov, Doctor of military science, full professor,
Institute of Public Administration and Research in Civil Protection,
Vadym Neroba, Ph. D.,*

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytskyi

**METHODOLOGICAL APPROACH TO SUBSTANTIATING REQUIREMENTS
FOR IMAGING MINE DETECTION EQUIPMENT INSTALLED ON UNMANNED
AERIAL VEHICLES**

The article proposes a methodological approach to substantiating requirements for the equipment installed on copter-type unmanned aerial vehicles for imagery mine detection in the visible wavelength range of the electromagnetic spectrum, for the purpose of mine clearance. Digital photographic and multi-zone photographic cameras are considered.

A goal of the article is to develop a methodological approach and apply it to substantiate requirements for imaging mine detection equipment installed on unmanned aerial vehicles.

The methodological approach is based on the mine signature model and a set of specific principles, including the principle of "modulation", the principle of "adaptation", the principle of "purposeful behavior", the principle of "external turbulence", the principle of "internal resistance", the principle of "mobility of the situation", the principle of "the forecasting ability", and the principle of "the unity of parts as a whole". Taking into account the interrelated parameters of the imaging mine detection equipment, the article shapes the required set of requirements for aerial mine detection heights, the matrix pixel size (spatial resolution) of imaging mine detection equipment, the mine/background brightness and contrast, the focal length and optical lens brightness of mine detection equipment, radiometric resolution, spectral resolution, and the weight of imaging mine detection equipment. The probability of performing the task of mine situation reconnaissance in the visible range of wavelengths of the electromagnetic spectrum by imaging mine detection equipment installed on unmanned aerial vehicles was chosen as the main criterion.

Further research may include compiling spectrozonal libraries for each type of mines, to make the most of hyperspectral landmine detection imaging, as well as developing requirements for imaging naval mine detection equipment installed on unmanned aerial vehicles.

Key words: *mine, mine detection, unmanned aerial vehicle.*