


ӘСКЕРИ ІС
ВОЕННОЕ ДЕЛО
MILITARY SCIENCE

УДК 623.3

DOI 10.52167/1609-1817-2022-123-4-556-563

С.П.Мосов¹, С.М.Салий² , А.А.Рахметжанов²

¹Институт государственного управления и научных исследований по гражданской защите,
Киев, Украина

²Пограничная академия КНБ РК, Алматы, Казахстан
E- mail: salii70@mail.ru

**МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ВИДОВОЙ АППАРАТУРЕ
ВЫЯВЛЕНИЯ МИН, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА БЕСПИЛОТНЫЙ
ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ**

Аннотация. В статье предлагается методика формирования требований к аппаратуре выявления наземных незамаскированных или частично замаскированных мин в ходе гуманитарного разминирования в оптическом диапазоне длин волн электромагнитного спектра, устанавливаемой на беспилотный летательный аппарат коптерного типа в интересах разминирования. Рассматриваются цифровые фотографические камеры. С учетом взаимосвязанных параметров видовой аппаратуры выявления наземных мин сформирована на системных основах совокупность требований к высотам ведения разведки мин с применением беспилотника коптерного типа, яркостному контрасту мина/фон, размеру элемента матрицы приемника, фокусному расстоянию и светосиле объектива видовой аппаратуры выявления наземных мин, а также ее весу. Данная статья подготовлена в рамках исследования финансируемого Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP14869765).

Ключевые слова. Беспилотный летательный аппарат, наземная мина, аппаратура выявления мин.

Введение.

Постановка проблемы. В настоящее время беспилотная авиация активно развивается и способна улучшить ситуацию с разрешением проблемы гуманитарного разминирования территорий по всему миру от разного вида наземных мин [1]. Вместе с тем, направление применения беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) для выявления наземных мин в интересах гуманитарного разминирования, являясь трендовым в мировом масштабе, всё еще находится на начальном этапе исследований и формирования проблематики относительно разработки методического подхода по формированию системных требований к видовой (прим. с формированием изображения) аппаратуре выявления мин в оптическом диапазоне волн электромагнитного спектра с использованием цифровых камер. Такие исследования в настоящее время проводятся в ряде стран мира: США, Россия, Великобритания, Израиль, Канада, Япония, Китай и др. [2].

Материалы и методы.

Разными по содержанию вопросами, связанными с исследованиями проблематики применения БПЛА для решения задач разведки наземных объектов, в том числе и мин,

занимались специалисты и ученые разных стран. Так, в коллективном труде [3] предлагается комплексировать средства инженерной разведки с БпЛА при выполнении задач выявления минно-взрывных заграждений и дальнейшего разминирования. На эти исследования ссылаются авторы в [4]. Аналогичный подход к ведению инженерной разведки с применением БпЛА изложен в [5]. В ряде источников из сети Интернет [6-9] приведена информация о возможных вариантах использования БпЛА коптерного типа для выявления мин и взрывоопасных предметов. Информация о разработке в США беспилотника с металлодетектором для поиска и выявления мин как на суше, так и на море, приведена в [10]. Исследовательский образец усовершенствованного квадрокоптера, созданного на базе БпЛА InstantEye Mk2 Gen3, оснащен двумя магнитометрами. Разработчики допускают, что указанный беспилотник позволит выявлять местонахождение мины и передавать ее координаты саперам. Авторский коллектив в [11] акцентирует внимание на международном опыте применения БпЛА для разминирования. В работе [12] авторы систематизировали условия и факторы, влияющие на применение беспилотника коптерного типа в ходе выявления наземных мин. В коллективном труде [13] предложен подход к выявлению наземных мин способом объединения видовых данных оптического диапазона длин волн электромагнитного спектра на основе БпЛА.

Вместе с тем, вопросы разработки методического подхода к формированию на системных основах требований к видовой аппаратуре выявления наземных мин (далее – ВАНМ) в оптическом диапазоне длин волн электромагнитного спектра, устанавливаемой на борту БпЛА, остаются в арсенале актуальных, что требует проведения отдельных исследований.

Цель статьи – разработка методического подхода к формированию состава требований к видовой аппаратуре выявления наземных мин, устанавливаемых на борту беспилотного летательного аппарата коптерного типа.

Результаты и обсуждения.

Исходя из принципа «модуляции», необходимо формализовать процесс модуляции оптического сигнала, поступающего на ВАНМ БпЛА от мины (места нахождения мины). Результирующая функция передачи модуляции (далее – ФПМ) выходного сигнала $T_{\Sigma}(N)$ в общем виде может быть представлена следующим образом:

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

где k – контраст по яркости объект/фон;

$T_{тур}(N)$ – ФПМ, отображающая влияние турбулентности атмосферы для оптического диапазона длин волн электромагнитного спектра;

$T_{зз}(N)$ – ФПМ, отображающая влияние сдвига изображения мины (места расположения мины);

$T_{аб}(N)$ – ФПМ, отображающая влияние аберраций оптической системы (далее – ОС);

$T_{диф}(N)$ – ФПМ, отображающая влияние дифракции ОС;

$T_{деф}(N)$ – ФПМ, учитывающая дефокусировку ОС;

$T_{фн}(N)$ – ФПМ, отображающая влияние фотоприемника; N – пространственная частота.

ФПМ, отображающая влияние турбулентности атмосферы, может быть определена по формуле [14]:

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

где σ_T – константа, которая характеризует влияние турбулентности атмосферы.

Анализ условий применения ВАНМ БПЛА коптерного типа при выполнении задач воздушной разведки, включая наземные мины [15], показывает, что выявление мин, как малоразмерных объектов, будут осуществляться с небольших высот (1-10 м). Учитывая это, будем считать, что $T_{тур}(N) = 1$.

Влияние сдвига изображения мины (места расположения мины) на цифровом аэроснимке в фокальной плоскости может происходить в условиях значительных скоростей полета БПЛА, что характерно для реактивной пилотируемой разведывательной авиации. Учитывая, что БПЛА коптерного типа имеют невысокие скорости полета, можно принять $T_{аб}(N) = 1$.

ФПМ, обусловленная дифракцией световой волны на входном зрачке ОС в фокальной плоскости, может быть определена с помощью приближенной формулы для средней длины волны оптического диапазона длин волн электромагнитного спектра [16]:

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

где d – диаметр входного зрачка объектива.

Учитывая отсутствие в современной ВАНМ БПЛА дефокусировки, при условии ее размещения на стабилизированной платформе на борту БПЛА, величину ФПМ, учитывающую дефокусировку ОС, принимаем равной единице: $T_{деф}(N) = 1$.

Формула для расчета ФПМ одного элемента дискретного фотоприемника имеет такой вид [16]:

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

где Δ – линейный размер одного элемента дискретного фотоприемника в фокальной плоскости.

С учетом вышеприведенного выражение для результирующей ФПМ примет такой вид:

$$T_{\Sigma}(N) = k T_{диф}(N) T_{фн}(N). \quad (5)$$

При условии допущения максимального (необходимого) значения яркостного контраста объект/фон, то есть $k=1$, выражение (5) переписывается в виде:

$$T_{\Sigma}(N) = T_{диф}(N) T_{фн}(N). \quad (6)$$

Поводя итог, следует указать, что основное моделирующее влияние на сигнал будут оказывать два фактора: дифракция ОС и дискретность фотоприемника ВАНМ БПЛА.

В этом случае модуляция оптического сигнала, поступающего от мины (места расположения мины) на ВАНМ БПЛА, учитывая (3) и (4), будет непосредственно зависеть от размера Δ одного элемента дискретного фотоприемника в фокусной плоскости.

Понятно, что высота H ведения разведки влияет на выходной оптический сигнал, что связано с его возможным рассеянием атмосферой. В случае квадрокоптера небольшие высоты его применения не будут значительно влиять на изменение энергетического уровня оптического сигнала. Вместе с тем, высота воздушной разведки наземных мин влияет на вероятность их обнаружения и распознавания [16, 17]:

$$P_3 = \exp \left[- \left(\frac{1,1H\Delta}{(l/b)f^4\sqrt{k}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где l – линейный размер мины.

Переменными параметрами для ВАНМ БПЛА, исходя из (7), являются: H , f и k . Изменение величины фокусного расстояния f будет определяться наличием оптического зума ВАНМ БПЛА. В этом случае можно изменять величину масштаба m изображения мины (контура мины), изменяя как H , так и f . Неизменными величинами являются Δ и l .

При выборе ВАНМ БПЛА для выполнения воздушной разведки с целью выявления наземных мин соотношение указанных выше параметров должно обеспечить выполнение условия: $P_3 > 0,7$ [17, 18].

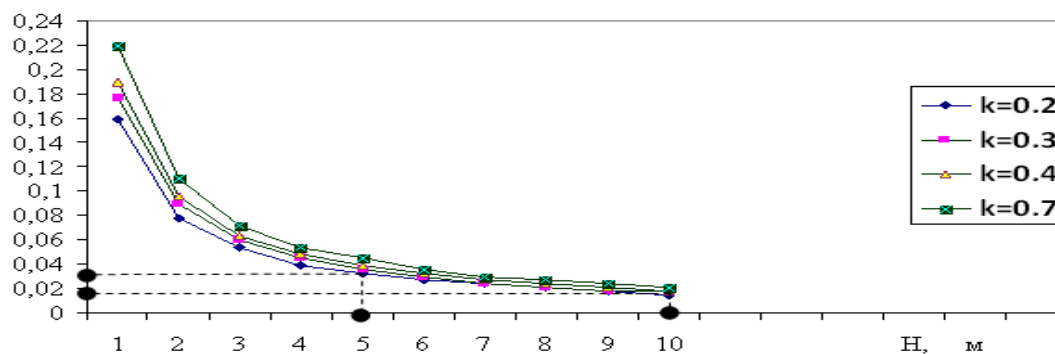
Расчеты, проведенные по (7) с использованием данных цифровой RGB-камеры senseFly S.O.D.A: диаметр l мины ПМН-2 = 120 мм; коэффициент формы $b = 1,36$; $f = 9$ мм; $k = 0,7$; $P_3 = 0,9$; размер элемента матрицы $\Delta = 2,3$ мкм, показали, что выявить и распознать, например, противопехотную мину ПМН-2 можно в незамаскированном виде на местности даже с высоты $H = 100$ м. При этом поперечный захват Z цифровой камеры на местности при угле поле ее зрения $2\beta = 64^\circ$ будет составлять 132 м.

В условиях частичного маскирования наземных мин выявление минной обстановки (мин) в ходе гуманитарного разминирования желательно выполнять на высотах до 10 м, что обеспечит высокое пространственное разрешение.

Расчеты, проведенные по (7) для условий: диаметр l мины ПМН-2 = 120 мм; коэффициент формы $b = 1,36$; $P_3 = 0,9$; $H = 10$ м и 5 м; $k = 0,7$ и $f = 10$ мм, показали необходимые размеры элемента матрицы: $\Delta_{10} = 0,021$ мм, $\Delta_5 = 0,043$ мм (рисунок 1).

Современные аэрофотокамеры БПЛА имеют размер одного элемента Δ матрицы в диапазоне: $0,0051 \div 0,0022$ мм, что меньше размера одного элемента приемника ВАНМ, рассчитанного со значительным запасом.

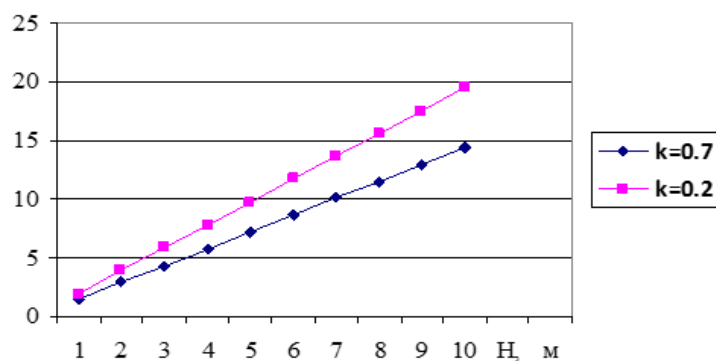
Если рассматривать противотанковую мину, например, ТМ-62М, то ее диаметр превышает диаметр мины ПМН-2 почти в три раза, а возможности выше указанных ВАНМ БПЛА по выявлению и распознаванию мины ТМ-62М, естественно, пропорционально больше, чем мины ПМН-2.



Примечание. Диаметр l мины ПМН-2 = 120 мм; $b=1,36$; $P_3 = 0,9$; $f = 10$ мм.

Рисунок 1 – Графики, характеризующие необходимый размер Δ дискретного элемента фотоприемника ВАВНМ БпЛА в зависимости от высоты ведения разведки H для условий $P_3 = 0,9$ при контрастах $k \geq 0,2$

На рисунке 2 приведены графики расчета возможностей RGB-камеры Zenmuse Z30 на платформе квадрокоптера Matrice200 SeriesV2 относительно предельных линейных размеров l мины для условий $P_3 = 0,9$ при различных контрастах $k \geq 0,2$.



Примечание. Размер элемента $\Delta = 0,0028$ мм; $b=1,36$; $P_3 = 0,9$; $f = 10$ мм.

Рисунок 2 – Графики, характеризующие линейный размер l мины (диаметр) от высоты ведения разведки H с использованием цифровой аэрофотокамеры Zenmuse Z30 для умов $P_3 = 0,9$ при контрастах $k \geq 0,2$

Анализ показывает, что использование цифровой аэрофотокамеры Zenmuse Z30 обеспечит решение задачи выявления и распознавания противопехотной мины ПМН-2 диаметром $l = 120$ мм с высот $H \leq 10$ м до типа при отсутствии маскировки. В условиях частичной маскировки Zenmuse Z30 обеспечит выявление контура мины ПМН-2 при $k \geq 0,2$.

Важной характеристикой для ВАВНМ БпЛА следует считать радиометрическое разрешение (связанно с яркостью), определяемое количеством градаций значений цвета, соответствующих переходу от яркости абсолютно «черного» к абсолютно «белому», и выражаемая в количестве бит на пиксель изображения [19]. Цифровая аэрофотокамера Zenmuse Z30 имеет, в соответствии с ее техническими характеристиками, радиометрическое разрешение 8 бит (формат JPEG), а цифровая аэрофотокамера Nikon P7000 – радиометрическое разрешение 16 бит (формат RAW). Человеческий глаз при условии тренированности может различить около 10 млн. цветов [20]. В формате JPEG формируется 16,8 млн. цветов, а формате RAW – 281 трлн. цветов.

Подводя итог относительно результатов исследования цифровых аэрофотокамер, следует в состав системных требований к ВАВНМ БпЛА в оптическом диапазоне длин волн ($\lambda = 0,38 \div 0,76$) электромагнитного спектра для ведения воздушной разведки наземных мин для задач гуманитарного разминирования включить (рис. 3): размер элемента матрицы $\Delta \leq 0,005$ мм; фокусное расстояние $f \geq 10$ мм для высоты воздушной разведки $H \leq 10$ м; оптический зум; светосила объектива – не хуже 1:2,8; радиометрическое разрешение: $8 \div 16$ бит; вес – до 600 г.



Рисунок 3 – Схема методики формирования совокупности системных требований к цифровым аэрофотокамерам, устанавливаемым на БпЛА для выявления наземных мин.

Заключение.

Применение предложенного методического подхода позволит сформировать требования к ВАВНМ в оптическом диапазоне длин волн электромагнитного спектра, планируемые для установки на БпЛА с целью выявления незамаскированных и частично замаскированных наземных мин в интересах гуманитарного разминирования.

Направления дальнейших исследований. Дальнейшие исследования следует считать применение спектрональных (мультиспектральных) цифровых камер оптического диапазона длин волн электромагнитного спектра для выявления наземных мин, а также разработку требований к видовой аппаратуре беспилотного летательного аппарата коптерного типа для выявления морских мин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мосов С., Попов М., Станкевич С. Виявлення наземних мін з використанням комплексу датчиків повітряного моніторингу оптичного діапазону. Цивільна безпека: Державне управління та кризовий менеджмент. 2022. №1. - С. 37-55.
- [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 обращения 2022-07-12).

[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. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/massoudhassani/mine-kafon-drone> (дата обращения 2022-08-14).

[9] Израильская компания продемонстрировала беспилотник, умеющий выявлять взрывчатку. URL: <https://www.rbc.ua/rus/news/aktsii-protesta-kieve-politsii-nazvali-kolichestvo-1479207958.html> (дата обращения 2022-08-14).

[10] ВМС США разработали БЛА с металлодетектором. URL: <https://warspot.ru/1676-vms-ssha-razrabotali-bla-s-metallodetektorom.ru/1676-vms-ssha-razrabotali-bla-s-metallodetektorom> (дата обращения 2022-08-19).

[11] Мосов С. П., Єременко С. А. Дрон розвідує міну 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 / EUROCON52738. 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, С. М. Салій, М.В. Погорецький, О. В. Селюков, А. Л. Феценко; 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. Космічна 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 обращения 2022-08-10).

[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 обращения 2022-08-10).

Сергей Мосов, э.ғ.д, профессор, Мемлекеттік басқару және азаматтық қорғау ғылыми-зерттеу институты, Киев, Украина, salii70@mail.ru

Сергей Салий, э.ғ.к, қауымдастырылған профессор, Қазақстан Республикасы Ұлттық қауіпсіздік комитетінің Шекара академиясы, Алматы, Қазақстан, salii70@mail.ru

Ардақ Ахметжанов, магистр, Қазақстан Республикасы Ұлттық қауіпсіздік комитетінің Шекара академиясы, Алматы, Қазақстан, salii70@mail.ru

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШАТЫН АППАРАТЫНА ОРНАТЫЛҒАН МИНАЛАРДЫ АНЫҚТАУ ТҮРЛІК АППАРАТУРАҒА ТАЛАПТАРДЫ ҚАЛЫПТАСТЫРУ ӘДІСТЕМЕСІ

Аңдатпа. Мақалада миналау мүддесінде коптер типті ұшқышсыз ұшу аппаратына орнатылатын электромагниттік спектрдің толқын ұзындығының оптикалық диапазонында гуманитарлық миналау барысында жер үстінде жасырылған немесе ішінара жасырылған миналарды анықтау аппаратурасына қойылатын талаптарды қалыптастыру әдістемесі ұсынылады. Сандық фотографиялық камералар қарастырылуда. Жер үсті миналарын анықтайтын түрлі аппаратураның өзара байланысты параметрлерін ескере отырып, жүйелік негіздегі коптер типті пилотсыз ұшқышты, минаның/фонның жарықтық контрастын, қабылдағыш матрицасы элементінің өлшемін, жер үсті миналарын анықтайтын түрлі аппаратура объективінің фокустық ұзындығын және жарық күшін, сондай-ақ оның салмағын қолдана отырып, миналарды барлауды жүргізу биіктіктеріне қойылатын талаптар жиынтығы қалыптастырылған. Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландыратын зерттеу шеңберінде дайындалған (№ AP14869765 гранты).

Түйінді сөздер. Ұшқышсыз ұшу аппараты, жер үсті миначасы, миналарды анықтау аппаратурасы.

Sergey Mosov, doctor of military sciences, professor, Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, Kyiv, Ukraine, salii70@mail.ru

Sergey Saliy, candidate of military sciences, associate professor, Academy of Border the National Security Committee of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, salii70@mail.ru

Ardak Rakhmetzhanov, master's degree, Academy of Border the National Security Committee of the Republic of Kazakhstan, Kazakhstan, Almaty, Almaty, Kazakhstan, salii70@mail.ru

METHODOLOGY FOR FORMING REQUIREMENTS FOR VIEWED MINES DETECTION EQUIPMENT INSTALLED ON UNMANNED AERIAL VEHICLE

Abstract. The article proposes a methodology for the formation of requirements for equipment for detecting ground uncamouflaged or partially camouflaged mines during humanitarian demining in the optical wavelength range of the electromagnetic spectrum, installed on a copter-type unmanned aerial vehicle in the interests of demining. Digital photographic cameras are considered. Taking into account the interrelated parameters of the visual equipment for detecting land mines, a set of requirements for the heights of conducting mine reconnaissance using a copter-type drone, the mine/background brightness contrast, the size of the receiver matrix element, the focal length and aperture ratio of the lens of the visual equipment for detecting land mines, as well as her weight. This article was prepared as part of a study funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP14869765).

Keywords. Unmanned aerial vehicle, land mine, mine detection equipment.
