

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ОТКРИВАНЕ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ НА ДРОНОВЕ ПО РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ПРОВЕДЕН ЛЕТАТЕЛЕН ЕКСПЕРИМЕНТ

Георги Сотиров¹, Росен Димитров², Евгени Хубенов¹

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²ВА “Г. С. Раковски” – София

e-mail: gsotirov@space.bas.bg; rokidok@abv.bg

Ключови думи: Антидрон, Откриване на дронове, Следене на дронове, Неутрализиране на дронове

Резюме: Представените са резултатите от изследването на мултисензорна система за откриване на дронове и ефективността на средствата за радиоелектронно противодействие на базата на проведен летателен експеримент. Предложената конфигурация осигурява ефективно откриване, съпровождане и подавяне на БЛА.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF A MULTI-SENSOR DRONE DETECTION AND COUNTERMEASURE SYSTEM BASED ON THE RESULTS OF A FLIGHT EXPERIMENT

Georgi Sotirov¹, Rosen Dimitrov², Evgeni Hubenov¹

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²Military Academy "G. S. Rakovski" – Sofia

e-mail: gsotirov@space.bas.bg; rokidok@abv.bg

Keywords: Anti-drone, Drone detection, Drone tracking, Drone neutralization

Abstract: The paper presents the results of the study of a multi-sensor drone detection system and the effectiveness of the radio-electronic countermeasures based on a flight experiment. The proposed configuration provides effective detection, tracking and suppression of UAVs.

Въведение

В резултат на бурното развитие на високите технологии през последните десетилетия безпилотните летателни апарати (БЛА), ситуирани в безпилотни авиационни системи (БАС), се очертаха и наложиха като съвременно и перспективно средство за въздушен мониторинг (т.е. наблюдение и контрол) на кризисни събития и процеси от военен и невоенен характер, както и за решаването на редица приложни задачи. Според оценки на водещи световни авиационни експерти БЛА по критерия „Ефективност/Стойност“ значително доминират над пилотируемите летателни апарати.

Войната в Украйна през 2022/2024 г. убедително демонстрира повишената роля на БЛА за целите на наблюдението, разузнаването, коригирането на ударите и огъня на авиацията, ракетните войски и артилерията по обекти от противостоящата страна и оценка на резултатите, както и за огнево въздействие от въздуха като мощно оръжие при слаба противовъздушна отбрана (ПВО), включително при наличие на борда на БЛА на средства за въздействие тип „камикадзе“. В този военен конфликт БАС се утвърждават, като най-ефективните и ефикасни разузнавателно – ударни системи, които съществено променят тактиката на боя на противостоящите страни.

Съвременните БЛА се характеризират [1–9, 22–24] с високата мобилност, икономичност и многоцелевост, ниска откриваемост (оптична, звукова, инфрачервена, радиолокационна) във

въздуха; високи възможности за получаване на информация за наблюдаваните стационарни и мобилни цели, миниатюризацията на средствата (включително на огневите), генериращи заплаха от въздуха и възможност за адекватна маскировка на БАС на Земята. Изброените предимства на БЛА водят до необходимостта от развитие на способности за съвременното им откриване, идентифициране, опознаване, определяне на координатите, вземането на решение и адекватно противодействие.

В този контекст създаването на адекватна система за защита от различни БЛА в решаваща степен зависи от наличието и ефективността на съвременна сензорна система за откриване, съпровождане и блокиране на дроневи е особено актуална задача и е предмет на изследване в настоящата публикация.

Задачите, решавани от сензорната система за откриване, съпровождане и блокиране на дроневи зависят от използваните методи за откриване и съпровождане на БЛА, както и от способите и средствата за противодействие на тези апарати. Това изисква критичен анализ на пасивните и активни методи за откриване на БЛА и на основните способности и средства за противодействието им – чрез огнево поразяване от средства за ПВО, електронно подавяне (ЕП), функционално поразяване със свръхвисококачествено излъчване и поразяване с лазерно излъчване.

Проведеният анализ на съвременното състояние и развитие на БЛА показват следните възможни задачи, решавани от сензорната система за откриване, съпровождане и блокиране на дроневи:

1. Откриване и съпровождане на БЛА с различни сензори (оптични, акустични, топлинни, радиолокационни, радиочестотни) и тяхното опознаване.
2. Разработка и използване на алгоритми, решаващи задачите на откриването, опознаването и съпровождането на БЛА.
3. Формулиране на демаскиращи признаци на БЛА.
4. Разкриване на параметрите на каналите за управление, навигация и комуникация на БЛА.
5. Блокиране (унищожаване) на дроневи чрез ЕП на каналите за управление, навигация и комуникация на БЛА.

Пълното решаване на изброените задачи следва да бъде насочено към най-сложните сред БЛА обекти за откриване и въздействие – малогабаритните и малоскоростни дроневи.

Анализът на приложение и развитие на антидрон системите показва, че на всеки от три до шест месеца се изменят оперативните и техническите им характеристики и използване. В момента има близо над 450 фирми в света, които произвеждат и предлагат антидрон системи.

В таблица 1 са приведени основните характеристики, предимства, недостатъци и диапазон на действие на основни сензори за откриване и съпровождане на дроневи, използвани в съвременни условия [10–21].

Таблица 1

Характеристика	Сензор	Предимства	Недостатъци	Зона на откриване
Топлина	Термовизор	<ul style="list-style-type: none"> • Слабозависим от атмосферните условия • Голям обхват 	<ul style="list-style-type: none"> • Ниска точност 	1–15 km
Радиочестотен сигнал	Радиочестотен приемник	<ul style="list-style-type: none"> • Не се влияе от препятствия • Откриване оператора на дрон 	<ul style="list-style-type: none"> • Невъзможност за откриване • Автономен полет 	3–50 km
Физически обект	Радар	<ul style="list-style-type: none"> • Слабозависим от атмосферните условия • Голям обхват 	<ul style="list-style-type: none"> • Висока цена • Изисквания за работен диапазон • Ограничена зона при препятствия 	1–20 km
Видимост	Оптическа камера	<ul style="list-style-type: none"> • Ниска цена • Минимални размери • Идентифициране 	<ul style="list-style-type: none"> • Висока зависимост от атмосферните условия • Ограничена зона при препятствия 	0.5–3 km
Акустичен сигнал	Акустичен приемник	<ul style="list-style-type: none"> • Съвместим с радиочестотните сензори • Минимални размери 	<ul style="list-style-type: none"> • Изключително ограничена зона на откриване • Ниска точност • Висока сложност за откриване на сигнала 	< 0.2 km

В процеса на изследване, беше разработено задание за „Проектиране и изграждане на сензорна система за откриване, съпровождане и блокиране (унищожаване) на дронове“, като в състава на изделието влизат: Система за откриване и съпровождане на дронове; Система за блокиране на дронове; Комуникационно-информационна система.

Сензорната системата за откриване и съпровождане на дронове включва: трикоординатна радиолокационна система; оптикоелектронна система; акустична система; лазерен локатор; термовизионна система.

Сензорната система на изделието следва да осигурява надеждно откриване и съпровождане на дронове, които се явяват заплаха за обекти от критичната структура, като обхватът за откриване да е минимум три километра и ефективно да може да проследи дрона на минимум 1 км.

Системата за радиоелектронно подавяне на изделието трябва да осигурява ефективна защита на обекти от критичната инфраструктура чрез: създаване на смущения на канала за управление на дрона; смущения с цел прекъсване на комуникацията на дрона с навигационната система; GPS/GLO-NASS spoofing (фалшифициране на навигационните координати); прехващане на управлението на дрона.

Комуникационно-информационна система обезпечавя свързаност между подсистемите на изделието, обработката и презентирането на данните и управлението.

Избор на сензори

За оценка възможностите на предложеното задание за разработване на антидрон система бяха предоставени и използвани следните сензори:

- Лазерен далекомер LDB 20 M (Фиг. 1), на фирма „Силита Дивелъпмънт“ ЕООД, който притежава следните тактико-технически характеристики [25]:

- Обхват 50 до 20000 m
- Зрително поле 7°
- Точност ± 2 m
- Интерфейс RS 232
- Температурен диапазон -20°C до + 55°C
- Тип лазер 1064 или 1570 nm
- GPS - да
- Захранване външно 10V до 32V / DC



Фиг. 1

- Оптичен сензор на фирма „Синтис“ (Фиг. 2) осигуряващ следните характеристики:



Фиг. 2

- Тип на сензора 640 x 512 InSb MWIR FPA (стандартен)
- 1280 x 720 InSb MWIR FPA (по избор)
- Разделителна способност 720p/1080p HD и NTSC/PAL
- Дължина на вълната 3-5 μm
- Обхват 30° до 0,25° (със стандартен FPA)
- Степен на увеличение 120x

- Трикоординатна радиолокационна станция „Ястреб“ на фирма „Промакс“, която включва в състава си антена - тип фазирана антенна решетка (Фиг. 3) и работно място за контрол и управление на радара (Фиг. 4), която е предназначена за автоматично откриване и проследяване на морски (надводни) и нисколетящи въздушни цели с малка ефективна отразяваща повърхност и работи в X диапазона.



Фиг. 3



Фиг. 4

За оценка възможностите на системата за радиоелектронно подавяне беше наета разработената от фирма „Синтис“ система (Фиг. 5), която създава смущаващи сигнали в 10 отделни комуникационни и GNSS честотни ленти: 432 - 436; 900 - 1170; 1171 - 1380; 1570 - 1620; 2400 - 2500; 5000 - 5400; 5400 – 5870 MHz; Мобилна лента 2G; Мобилен обхват 3G; Мобилен обхват 4G; GNSS заглушаване следните системи - GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, IRNSS, QZSS [26];



Фиг. 5

В състава на системата влиза подсистемата за хакерство, която предлага съвременно решение - от откриване до блокиране, като поема контрола над безпилотния дрон и го приземява безопасно в предварително определена зона. Това се извършва чрез проникване в комуникационния канал между дрона и дистанционния контролер (ДК).

Хакерската подсистема се състои от два основни компонента: Софтуерно дефинирано радио и антена. Тя идентифицира уникалните параметри на комуникацията между дрона и ДК, след което софтуерно дефинираното радио (SDR) може да изключи съответния дрон от неговия ДК и да поеме пълен контрол над дрона.

Тя открива дрона чрез прекия и уникален комуникационен канал между дрона и дистанционния контролер. След това системата поема контрола над дрона, като му изпраща

команден сигнал и го препрограмира. Това решение ефективно открива и ограничава действието на безпилотни дроне в чувствителни зони, без да влияе на комуникациите и без да използва кинетика. Всичко това се извършва, без да се пречи на другите средства за комуникация и без риск от съпътстващи щети.

Във връзка с изпълнението на работната програма на задача 3.1.7. „Проектиране и изграждане на сензорна система за откриване, съпровождане и блокиране (унищожаване) на дроне“ от Националната научна програма „Сигурност и отбрана“ през месец септември 2024 г. на летище на територията на Пернишка област се проведеха летателни експерименти съвместно с екипи и дроне на ВА „Г.С.Раковски“, както и използване на оборудване за създаване на смущения на фирма „Синтис“, радиолокационен и лазерен сензори на фирма „Промакс“ и „Силита Дивелъпмънт“.

За реализирането на летателните експерименти предварително беше създадена необходимата организация с местната власт, в чието землище се проведе експеримента (Фиг. 6).



Фиг. 6

За гарантиране на необходимата безопасност с въздушния трафик - граждански въздухоплавателни средства се осигури координация и взаимодействие в реално време със структури от ДП „Ръководство въздушно движение“ - FIR – София. Нямаше никаква индикация за наличие на смущения в оперативна зала на РВД (Фиг. 7).



Фиг. 7

От пилотите на БЛА, беше предварително изготвен план на полетите, както с БЛС тип „Коптер“, така и с БЛС тип „Самолет“.

Разположението на сензорите и системата за подавяне на летищната полоса е представено на Фиг. 8.



Фиг. 8

В процеса на експериментите пред участниците бяха изследвани възможностите на сензорните системи – РЛС „Ястреб“ и лидар, които показаха надеждно откриване и съпровождане на различни типове БЛА, в това число и дронове от типа „DJI 2“ (Фиг. 9), „Mini“ (Фиг. 10), „D3C“, „FMX8-mini“ (Фиг. 11) и четири инчов FPV в зоната на разрешените за полети дистанции 250 - 350 м.



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

Резултати от експеримента

Съгласно работната програма бяха оценени и възможностите на системата на фирма „Синтис“ за ефективно подавяне на системите за управление и навигация на използваните БЛА в следните честотни диапазони – 433 MHz, 1575 MHz – GPS канали, 2400 - 2485 MHz – WiFi1 и 5725-5875 MHz – WiFi2.

При полет към смутителите и активиране на смущенията се констатира наличие на смущения в канала за спътникова комуникация във всички полети, на всички типове безпилотни летателни системи (Фиг. 12).



Фиг. 12

При полет от наземната станция към смутителите и активиране на смущения в канала за комуникация „Борд-наземна станция“ не се наблюдаваха смущения на комуникацията „Борд-станция“, при прелитане над смутителите и отдалечаване от тях и от наземната станция канала за управление бе смутен, но БЛА в автономен режим продължи устойчиво полета по зададения маршрут.



Фиг. 13

Заклучение

В заключение можем да отбележим, че резултатите от експеримента позволяват, да се направят следните изводи:

1. Използваните сензори удовлетворяват заложените изисквания на разработеното задание и осигуряват ефективно откриване, съпровождане и подавяне на БЛА.

2. Предоставените и участващите в летателния експеримент разработките на български фирми могат да служат като база за създаване и надграждане на съвременни антидрон системи.

Благодарности

Настоящият доклад е изготвен в рамките на проект по т.3.1.7 от Национална научна програма „Сигурност и отбрана“ (приета с РМС № 731 от 21.10.2021 г.) и съгласно Споразумение № Д01-74/19.05.2022 г. между МОН и Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров“

Литература:

1. Alzahrani, B, Oubbati OS, Barnawi A, Atiquzzaman M, Alghazzawi D (2020) UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges. *J Netw Comput Appl* 166:102706. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102706>
2. Shakhtrah, H, Sawalmeh AH, Al-Fuqaha A, Zuochao D, Almaita E, Khalil I, Othman NS, Khreishah A, Guizani M (2019) Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access* 7:48572-48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
3. Mitka, E, Mouroutsos SG (2017) Classification of drones. *Am J Eng Res* 6(7): 36-41. Mohamed N, Al-Jaroodi J, Jawhar I, Idries A, Mohammed F (2020) Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities. *Technol Forecast Soc Change* 153:119293. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.004>
4. Singhal, G, Bansod B, Mathew L (2018) Unmanned aerial vehicle classification, applications and challenges: A review Preprints: 2018110601. <https://doi.org/10.20944/preprints201811.0601.v1>
5. Nijim, M, Mantrawadi N (2016) Drone classification and identification system by phenome analysis using data mining techniques. Paper presented 2016 IEEE Symposium on Technologies for Homeland Security (HST). IEEE; Waltham, Massachusetts, United States of America. <https://doi.org/10.1109/THS.2016.7568949>
6. Gupte S, Mohandas PIT, Conrad JM (2012) A survey of quadrotor unmanned aerial vehicles. Paper presented 2012 Proceedings of IEEE Southeastcon. IEEE; Orlando, Florida, United States of America. <https://doi.org/10.1109/SECon.2012.6196930>
7. Ostojic G, Stankovski S, Tejic B, Đukić N, Tegeltija S (2015) Design, control and application of quadcopter. *Int J Ind Eng Manag* 6(1):43-48.
8. Sørensen LY, Jacobsen LT, Hansen JP (2017) Low cost and flexible UAV deployment of sensors. *Sensors* 17(1):154. <https://doi.org/10.3390/s17010154>
9. Yaacoub, J.P., Noura, H., Salman, O. and Chehab, A. (2020) 'Security analysis of drone's systems: Attacks, limitations, and recommendations', *Internet of Things*, 11, 100218. doi: 10.1016/j.iot.2020.100218
10. Andrašić, P., Radišić, T., Muštra, M. and Ivošević J. (2017) 'Night-time detection of UAVs using thermal infrared camera', *Transportation Research Procedia*, 28, pp. 183–190. doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.184
11. Al-Sa'd, M.F., Al-Ali, A., Mohamed, A., Khattab, T. and Erbad, A. (2019) 'RF-based drone detection and identification using deep learning approaches: An initiative towards a large open-source drone database', *Future Generation Computer Systems*, 100, pp. 86–97.
12. Schäffer, B., Pieren, R., Heutschi, K., Wunderli, J.M. and Becker, S. (2021) 'Drone noise emission characteristics and noise effects on humans – A systematic review'. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(11), p. 5940. doi: 10.3390/ijerph18115940
13. Gannot, S., Burshtein, D. and Weinstein, E. (2001) 'Signal enhancement using beamforming and nonstationarity with applications to speech', *IEEE Trans. Signal Processing*, 49, pp. 1614–1626. doi: 10.1109/78.934132
14. Abdullah, R.S.A., Saleh, N.L., Rahman, S.M.S.A., Zamri, N.S. and Rashid, N.E.A. (2019) 'Texture classification using spectral entropy of acoustic signal generated by a human echolocator', *Entropy*, 21, p. 963. doi: 10.3390/e21100963.
15. Hirabayashi, M., Kurosawa, K., Yokota, R., Imoto, D., Hawai, Y., Akiba, N., Tsuchiya, K., Kakuda, H., Tanabe, K. and Honma, M. (2020) 'Flying object detection system using an omnidirectional camera', *Forensic Science International: Digital Investigation*, 35, 301027. doi: 10.1016/j.fsidi.2020.301027
16. Wu, Y., Sui, Y. and Wang, G. (2017) 'Vision-based real-time aerial object localization and tracking for UAV sensing system', *IEEE Access*, 5, pp. 23969–23978. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2764419
17. Barisic, A., Car, M. and Bogdan, S. (2019) 'Vision-based system for a real-time detection and following of UAV', *Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (REDUAS)*, 2019, pp.156–159. doi: 10.1109/REDUAS-47371.2019.-8999675.
18. Oh, J., Lim, D.W. and Kang, K.M. (2020) 'Unmanned aerial vehicle identification success probability with LoRa communication approach', in *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 23–27 September 2019, Toulon, France, pp. 1–6. ; doi: 10.1109/PIMRC48278.2020.9217172.

19. Solidakis, G.N. (2017) 'An Arduino-based subsystem for controlling UAVs through GSM', 6th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), 23–27 September 2019, Toulon, France, pp.1–4. doi:10.1109/MOCASST.2017.-7937656.
20. Ferreira, R., Gaspar, J., Sebastião, P. and Souto, N. (2022) 'A software defined radio based anti-UAV mobile system with Ja'ming and spoofing capabilities', Sensors, 22, p. 1487. doi: 10.3390/s22041487.
21. Park, S., Kim, H.T., Lee, S., Joo, H. and Kim, H. (2021) 'Survey on anti-drone systems: Components, designs, and challenges', IEEE Access, 9, 42635–42659. [9378538]. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065926.
22. Хубенов, Е., Г. Сотиров, З. Хубенова, Безпилотни авиационни системи с елементи на изкуствен интелект в интернет среда, Seventeenth International Scientific Conference „Space, Ecology, Safety”, PROCEEDINGS SES`21, стр. 121–127, София
http://space.bas.bg/SES/archive/SES%202021_DOKLADI/PROCEEDINGS%20SES%2021.pdf
23. Сотиров, Г., Е. Хубенов, З. Чифлиджанова, Агрегиране на услуги, базирани на изкуствен интелект, в интегрирани мобилни системи за мониторинг в интернет среда, International Scientific Conference „Space, Ecology, Safety”, PROCEEDINGS SES`22, SRTI-BAS, 2022, стр. 127–133, София
http://space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/7_Sotirov.pdf
24. Гецов, П., Б. Рангелов, Г. Мардиросян, Г. Сотиров, Д. Недялков, Д. Зафиров, З. Хубенова, П. Пенев, П. Граматиков, Е. Хубенов, Н. Загорски. Анализ на риска и заплахите, върху критичната инфраструктура при природни бедствия, аварии и кризи на територията на Република България. Proceedings SES`2022, SRTI-BAS, 2022, стр. 251–261;
http://space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/4_Ecology/1_Getsov.pdf
25. Проспектни материали на фирма „Силита Дивелъпмънт“ЕООД.
26. Проспекти материали на фирма „Синтис“.