

**TECHNIQUES TO PROTECT KEY OBJECTS
FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES³²**

Eng. Georgi Georgiev PhD Student

Department of Telecommunications,
“Angel Kanchev” University of Ruse, Bulgaria
Tel.: +359 82 888 353
E-mail: gdgeorgiev@uni-ruse.bg

Assist. Prof. Stanimir Parvanov

Air Defence Department, Shumen
“Vasil Levski” National Military University, Veliko Tarnovo
Tel.: +359 885 123 955
E-mail: ssparvanov@gmail.com

Assist. Prof. Georgi Kozarev

Air Defence Department, Shumen
“Vasil Levski” National Military University, Veliko Tarnovo
Tel.: +359 894 312 246
E-mail: goshakis@abv.bg

***Abstract:** This paper reviews and compares different unmanned aerial vehicle (UAV) countermeasures, and suggests techniques for combining Anti-drone radar systems. Nowadays, every smart device is networked and can be controlled remotely or collect information about the activity or cycle of actions it performs. The more connected the devices are, the more difficult it becomes to protect them during data transfer. If until now the main protection of networks was cyber security and the protocols and certificates introduced for data transfer protection, it should be noted that in recent years, UAVs have also developed, which pose a threat to networks on another level. UAVs can undetected spy on key servers, data warehouses, military sites, airports, critical infrastructure sites and destabilize or stop their operation.*

***Keywords:** Grid protection, Unmanned Aerial Vehicles, Air Defense, Anti-drone radar systems, Protection.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Човечеството се намира в разцвета на информационната и комуникационна свързаност. Това го доказват всички устройства, които позволяват нашата комуникация, а така също и Интернет на нещата. В днешно време всяко смарт устройство е свързано в мрежа и може да бъде управлявано отдалечено или да събира информация за дейността или цикъла от действия, които извършва. Колкото по-свързани са устройствата толкова по-трудно става тяхното защитаване при преноса на данни. Ако досега основната защита на мрежите беше киберсигурността и въведените протоколи и сертификати за защита при преноса на данни, трябва да се отчете, че през последните години, своето развитие получиха и безпилотните летателни средства (БЛА), които отправят заплаха към мрежите от друго ниво. БЛА могат незабелязано да разузнаят ключови сървъри, складове на данни, военни обекти, летища и обекти от критична инфраструктура и да дестабилизираят или спрат тяхната работа. Възникването на нова опасност налага и разработването на ефективни устройства и способности за борба с безпилотните летателни средства. В този доклад се разглеждат и сравняват съвременните средства за борба с БЛА като предлага и техники за комбинация от способности за борба с разработените анти-дрон радарни системи.

³² Докладът е представен на сесия на секция 3.2 на 28 октомври 2022 със заглавие TECHNIQUES TO PROTECT KEY OBJECTS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

ИЗЛОЖЕНИЕ

В този доклад ще бъдат разгледани мобилни и преносими радарни системи за противодействие на БЛА с малък и среден обсег на откриване като целта на това проучване е повишаване ефективността от съвместно използване на създадените към момента устройства за борба срещу микро, малки, фото и GPS дроне. Насочеността на доклада към малоразмерния тип дроне е породена от факта, че те са малки, безшумни и летят на ниска и пределно ниска височина, което прави откриването им изключително трудна задача. Пример за използване на дроне е продължаващият конфликт между Русия и Украйна, в който ясно се вижда, че съвременните системи за ПВО успешно откриват и противодействат на големите безпилотни летателни средства. Факт е също, че малкия тип БЛА са широко използвани за разузнаване на сгради, гористи терени и т.н. и за снемане на снимков материал, който дава информация за наличие и численост на хора и техника, а също така може да покаже и техните координати, което прави артилерийските удари особено ефективни. За разлика от големите безпилотни летателни апарати малките могат да бъдат също толкова опасни оставяйки незабелязани.

Класификация на БЛА според големината и типа на полет:

На фигура 1 са изобразени различните видове според начина на полет и големина безпилотни летателни апарати.

Класификация на анти-дрон радарните системи за откриване на безпилотни летателни средства.

Анти-дрон радарите се класифицират както следва:

- 2D радари;
- 3D радари;
- Радари с непрекъснато излъчване;
- Радари със синтезирана апертура;
- Радари с фазирана антенна решетка;
- Мобилни радарни системи;
- Статични радарни системи;
- Преносими радарни системи;
- Радарни системи съвместени с други средства за противодействие на БЛА;
- Вторични радари.



1.Еднороторни;



2.Многороторни;



3.Фиксирани крила;



4.Хибридни крила;



5.Малък дрон;



6.Микро дрон;



7.Тактически дрон;



8.Разузнавателен дрон;



9.Голям боен дрон;



10.Голям дрон;



11.Дрон камикадзе;



12.GPS дрон;



13.Дрон всъдеход;



14.Фото – дрон.

Фиг. 1. Класификация на БЛА според големината и типа на полет

Основни характеристики на радарните системи.

Радарните системи се използват широко в различни области като определят разстоянието, скоростта и азимута на целите. Точността е основен параметър за радарната система. Различните цели имат различна ефективна отразяваща повърхност и от това зависи мощността на отразените импулси. Важно е да измерване на отразената мощност според предаването. От честотата на излъчвания сигнал зависи максималното разстояние за откриване на цели от радара. От целия честотен спектър в радарната технология се използва честотен диапазон започващ от 3MHz като може да достигне няколко десетки GHz. Този честотен диапазон е разделен на няколко ленти с буквено обозначение за всяка от тях съгласно IEEE стандарта. В този доклад се разглежда честотния диапазон от 5GHz до 12GHz, като буквеното обозначение на този диапазон е „С“ и „Х“ честотни лента. Използваната честота зависи от целта, за която ще бъде използвана радарната система. В таблица 1 са показани различните дължини на вълните според честотата на излъчвания сигнал (Monik D., Rohidas P., Kirit B., 2022).

Таблица 1. Разпределение на високочестотния диапазон

Честотна лента	Честота (GHz)	Дължина на вълната (см)
Много високи честоти (ВХЛ)	0.03 - 03	1000 - 100
Ултрависоки честоти (УВЧ)	0.3 - 1	100 - 30
L	1-2	30 - 15
S	2 - 4	15 – 7.5
C	4-8	7.5 – 3.75
X	8 – 12.5	3.75 – 2.4
Ku	12.5 - 18	2.4 – 1.7
Ka	18 - 40	1.7 – 0.75
V	50 - 75	0.60 – 0.40
W	75 - 111	0.40 – 0.27

Връзката между излъчената и получената мощност на сигнала може да бъде изразена по следния начин:

$$P_r = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \frac{\sigma}{4\pi R^2} A^e = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad [W] \quad (1)$$

където:

- P_r – мощност на излъчвания сигнал
- P_t – мощност на приетия сигнал
- G – коефициент на усилване на антената
- σ – ефективна отразяваща повърхност
- A^e – апертура на антената
- R – разстояние до целта
- λ – дължина на вълната

Максималното разстояние на откриване на цели е изразено в (2)

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G \sigma A^e}{(4\pi)^2 S_{min}} \right]^2 \quad (2)$$

където:

- R_{max} – максимално разстояние;
- P_t – мощност на излъчвания сигнал;
- G – приети ехо-сигнали;
- σ – ефективна отразяваща повърхност;
- A^e – апертура на антената;
- S_{min} – минимална мощност на приемания сигнал.

Разделителната способност (англ. Range Resolution) на радарните системи е параметър осигуряващ разделено наблюдение на цели на еднакво разстояние, но близко разположени помежду си, т.е. на различен азимут, които не се сливат като една цел на индикатора за наблюдение на въздушната обстановка около точката на стоене на радара. Този параметър се определя от формула (3).

$$\Delta d > \frac{c}{2ST_c} = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

Където,

- c – скоростта на светлината;
- B – честотния диапазон, в който работи радиолокационната станция.

Проблемът с откриването на БЛА изисква изследване на вече разработени решения, прилагани в други области или търсене и разработване на нови технически и софтуерни решения. За откриване и съпровождане на малоразмерни безпилотни въздушни обекти носещата честота на радарната система трябва да бъде от порядъка на 5GHz до 12GHz. Тези високи честоти са необходими, тъй като подобряват разделителна способност на радарите. В днешно време широко разпространени са радиолокационните средства за далечно откриване на цели, които работят в честотния диапазон от 2GHz до 4GHz. Трябва да се отчете, че при повишаване на излъчваната честота, също така се подобрява разделителната способност, но това е за сметка на максималното разстояние на откриване на целите. Към тези дни най-голям интерес за изследване и откриване на БЛА е чрез радари с неподвижни компоненти (Solid-state radars(SSR)) работещи с технологиите „Непрекъснато излъчване с модулирани сигнали“ (Frequency-modulated continuous-wave (FMCW)) и „Импулсна компресия“ (Pulse compression). Тези две технологии могат да работят в режим „Компресиран високоинтензивен излъчван импулс“ (Compressed High-Intensity Radiated Pulse (CHIRP)). CHIRP позволява периодично увеличаване или намаляване на излъчваната носеща честота, като първоначално е използван при сонарите, а в днешни дни технологията е интегрирана в радарните системи за граждански и военни цели, като най-разпространена е при радарите поставяни върху лодките и корабите, като успешно следят метеорологичната обстановка, обезпечават предупреждение при опасност от сблъсък и дори могат да откриват и следят птици.

Получени резултати.

Таблица 2: Резултати при ЕОП = $0.02m^2$

Разстояние (км)	Мощност [dBm]
0.5	-68.95
1	-74.97
2	-80.99
3	-84.51
5	-88.95
10	-94.97
50	-108.95
100	-114.97
500	-128.95
100	-134.97

Таблица 3: Резултати при ЕОП = $0.01m^2$

Разстояние (км)	Мощност [dBm]
0.5	-61.97
1	-67.99
2	-74.01
3	-77.53
5	-81.97
10	-87.99
50	-101.97
100	-107.99
500	-121.97
100	-127.99

Таблица 4: Резултати при ЕОП = $0.05m^2$

Разстояние (км)	Мощност [dBm]
0.5	-44.98
1	-51
2	-57.02
3	-60.54
5	-64.98
10	-71
50	-84.98
100	-91
500	-104.98
1000	-111

От получените резултати в таблица 2, таблица 3 и таблица 4 става ясно, че колкото по-малка е ЕОП, мощността на отразените ехо-сигнали намалява при отдалечаване на БЛА от радара, а при по-голяма ЕОП мощността на отразените сигнали намалява много по-малко сравнение, с обекти с по-малко ЕОП, което също така позволява и тяхното откриване и съпровождане на по-голямо разстояние (Monik D., Rohidas P., Kirit B., 2022).

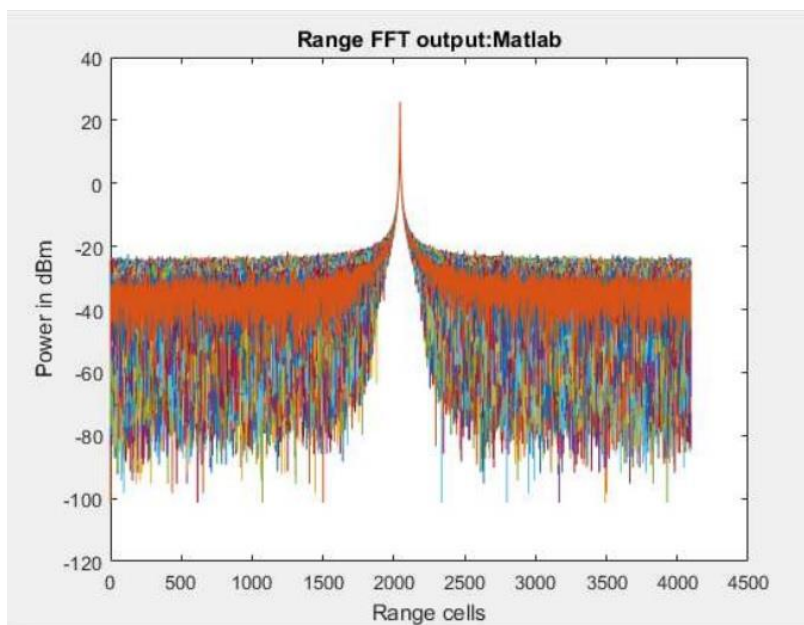
При излъчвана мощност $-0\text{dBm} = 1\text{mW}$, съотношение сигнал/шум (С/Ш) = 20dB и ефективна отразяваща повърхност = 0.02m^2 , резултатите са изобразени в таблица 2.

Резултатите в таблици 2,3 и 4 са получени чрез симулации с MIMO антена при следните параметри, посочени в таблица 5.

Таблица 5 Параметри на апаратурата, с която са проведени изследванията

Параметри	Стойност
Първоначална честота (f_0)	5.7 GHz
Крайна честота (f_1)	5.9 GHz
Период за изменение на честотата (B_{sweep})	100msec
Период на повторение (T_d)	10msec
Разстояние м/у елементите на приемащата антена ($d-R_x$)	$4*\lambda$
Разстояние м/у елементите на предаващата антена ($d-T_x$)	$5*\lambda$
Мощност на сигнала	-10dBm
Мощност на шума	-38dBm
Съпротивление	50

За симулацията са използвани посочените параметри в Таблица 5. Също така са използвани 8 антени за да бъде приложен MIMO (multiple input – multiple output) способа заедно с цифрово формиране на диаграма на насочено действие. Фигура 2 илюстрира спектрален анализ получен в съотношение мощност спрямо разстояние на елементите в излъчващата антена, посредством симулационна среда Matlab.



Фиг. 2. Спектрален анализ на получените резултати

В труда на (Rudys, S., Ragulis, P., 2022) са изследвани два съществуващи радара на норвежката фирма Simrad. Двата радара са показани в таблица 6 и фигури 3 и 4.

Име	Технология	Мощност	Размер на антена
Simrad 4G	FMCW	0.3W	38см
Simrad Halo 3	Pulse compression	25W	100см

Таблица 6 Радари с различна SSR технология

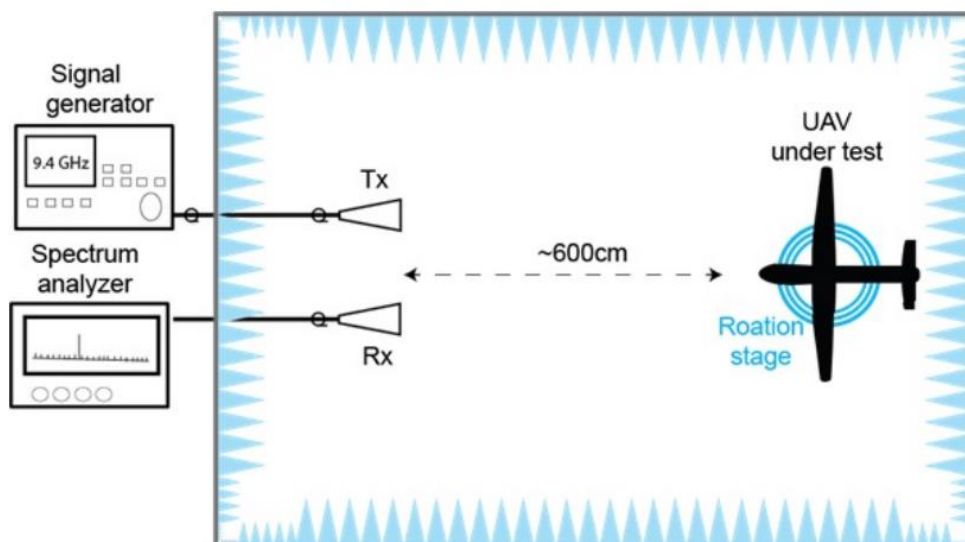


Фиг. 3. Simrad Halo 3



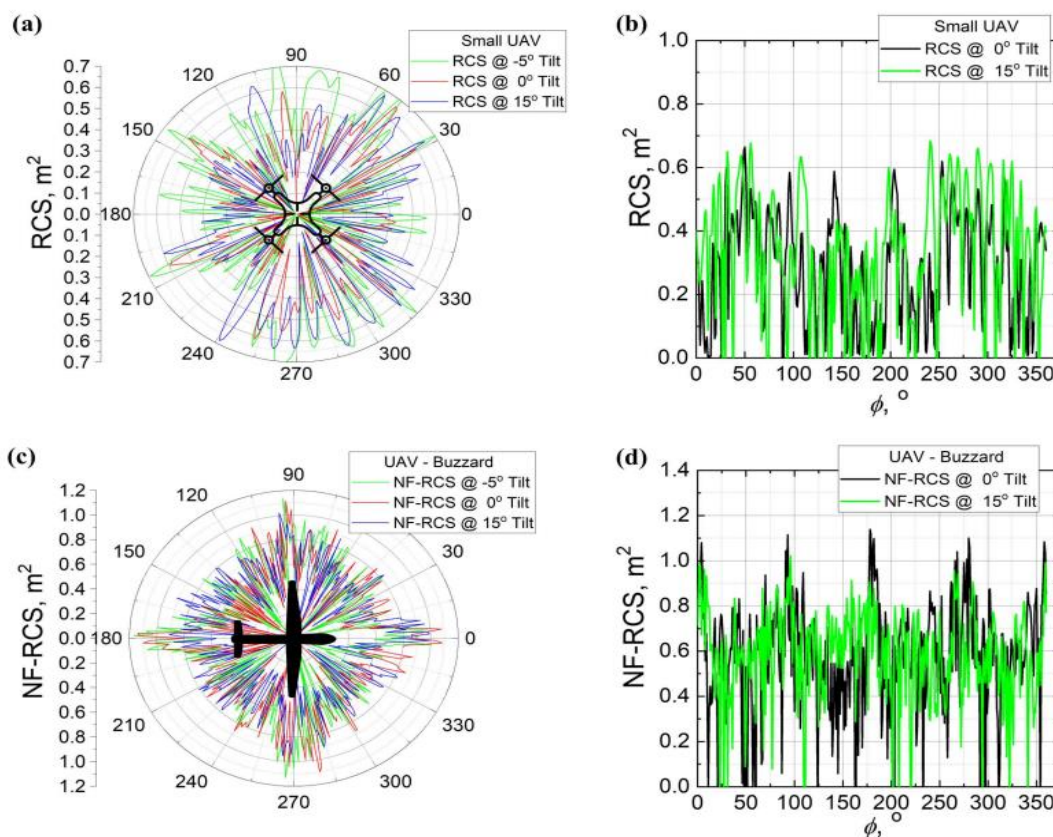
Фиг.4. Simrad 4G

За сравнението на способността за откриване на малоразмерни цели и измерване на ЕОП при различни ъгли и позиция на безпилотните апарати с двата радара са проведени измервания в безехова стая с размери 8.4м×4.6 м×3.7м. Предавателната и приемната антена са разположени на 6 m от тествания БЛА. Измерванията са направени с еднороторен дрон с фиксирани крила и многороторен малък дрон. На фигура 5 е показана схема с разположението на дроновете и антените в безеховата камера. На фигура 6 са изобразени резултатите от ЕОП на двата вида БЛА при различна ротация и ъгъл на място.



Фиг. 5. Схема на безехова стая

Радарните измервания от получените ехо-сигнали спрямо ефективната отразяваща повърхност на многороторния безпилотен летателен апарат изобразени на фиг.6а в полярна равнина и фиг.6б във фазова равнина ясно показват резултатите при различните ъгли на наклон с различни цветове. Също така от фигурата се вижда, че ЕОП на БЛА достига до $0,7m^2$. От друга страна пък се вижда, че при еднороторния безпилотен летателен апарат с фиксирани крила, съответно показани във фиг. 6с и 6д ясно се виждат максимумите в 0° , 90° , 180° и 270° . Тези ъгли представляват носа, крилата и опашката на



Фиг. 6. Анализ на ЕОП на два различни вида БЛА в безехова стая

Тези ъгли представляват носа, крилата и опашката на БЛА, а ЕОП при тях достига до $1,2m^2$. Трябва да се отбележи, че при вариране на ъгъла на наклон от 0° до 10° няма промяна

в параметрите на приетите ехо-сигнали, но при достигане ъгъл на място = 15° , ЕОП намаля от $1,2m^2$ на $0,8m^2$.

В обобщение на получените резултати може да се каже, че двете технологии FMCW и Pulse compression се справят еднакво добре в безехова камера. Експериментите на открито обаче показват, че Halo – 3 е способен да открие многороторния дрон на разстояние над 1км, но не се справя така добре в близката зона като Simrad 4G, който отлично открива БЛА на 400m до 1км. Това също така се дължи и на разликата в консумираните мощности на двата радара. Трябва да уточним, че експериментите са направени при носеща честота 9.4GHz, което отговаря на „X“ лентата.

Предимства и недостатъци на измерваните технологии:

- SSR консумират значително по-малко енергия сравнение с радарите използващи магнетрони;
- SSR работят в честотен диапазон 5÷12GHz, а радиолокационните средства ползващи магнетрони от 2÷4 GHz;
- SSR не се нуждаят от периодична смяна на компоненти;
- SSR не се нуждаят от време за затопляне на компоненти от съставляващия ги хардуер;
- SSR радарите имат много по-добра разделителна способност от радарите ползващи магнетрони, но това е за значително намалената им зона на откриване на цели;
- Могат да бъдат с малки размери, а FMCW технологията позволява тяхната работа дори чрез захранване от батерия;
- SSR с консумират мощност в порядъка 0.3W до 500W, а радарите ползващи магнетрони от 5kW до 25kW.
- Pulse compression радарите консумират повече енергия от FMCW;
- SSR радарите могат да бъдат използване за откриване на разузнавателни малки БЛА при провеждане на срещи от високо ниво, при защита на военни обекти и съоръжения от критичната инфраструктура;
- SSR могат да бъдат добавяни към ключови зони на съществуващи военни и летищни радари осигурявайки им информация за прелитачи малки безпилотни летателни средства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усъвършенстването на безпилотните летателни апарати значително изпреварва средствата за тяхното контролиране, откриване и неутрализиране. Това разкрива нов вид опасност за комуникациите, тъй като те могат да бъдат атакувани не само софтуерно, а също така физически като бъде разузнато местоположението на ключови сървъри или комуникационни възли, а така също компрометирана тяхната работа чрез спиране на електричеството и други. Съществуващите радарни технологии основаващи се на solid-state radar технологията с непрекъснато излъчване на модулирани сигнали (FMCW) и импулсна компресия (pulse compression) работещи в режим „Компресиран високоинтензивен излъчван импулс“ (CHIRP) са обект на постоянни изследвания. Те биват комбинирани с различни форми и видове антени, а така също за спомагане на тяхната работа биват добавяне различни сензорни и оптични компоненти. Тази нова технология може да бъде комбинирана в мрежа от радари или в комбинация със досегашните, които нямат капацитет на откриват малоразмерни безпилотни летателни апарати.

БЛАГОДАРНОСТИ

Този доклад е реализиран с подкрепата на Проект No 2021 – ФЕЕА – 03 „Създаване на роботизирана автономна платформа за получаване и анализ на спектрални изображения на земната повърхност“ на Русенски университет „Ангел Кънчев“.

REFERENCES

Carvalho, M., (2016). Experimentation Support for Cyber Security Evaluations, *Proceedings of the 11th Annual Cyber and Information Security Research Conference – CISRC 39*, 2016;

Demir, K., (2015). Unmanned Aerial Vehicle Domain: Areas of Research, *Defence Science Journal*, 2015;

A Review on Identification of RADAR Range for the Target by using C Band, IRJET, Volume: 09, 05 May 2022 e-ISSN: 2395-0056;

Rudys, S., Ragulis, P., Laučys, A., Bručasand, D., Pomarnacki, R., & Plonis, D., (2022). Investigation of UAV Detection by Different Solid-State Marine Radars, *Electronics*, 2022, 11, 2502.

Dodiya, M., Pawar, R., & Bhuva, K. (2022). A Review on Identification of RADAR Range for the Target by using C Band, Volume: 09 Issue: 05, May 2022; e-ISSN: 2395-0056.

<https://aerocorner.com/blog/types-of-drones/>

<https://aerocorner.com/blog/types-of-drones/>

<https://easyelectronics.co.in/radar-range-equation/>

<https://www.simrad-yachting.com/>