

## МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ОТКРИВАНЕ И КЛАСИФИКАЦИЯ НА БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ С ЕЛЕМЕНТИ НА ИЗКУСТВЕН ИНТЕЛЕКТ

**Евгений Хубенов, Георги Сотиров, Зоя Чифлиджанова**

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: zhubenova@space.bas.bg*

**Ключови думи:** мултисензорна система, БЛА, анти-дрон, изкуствен интелект, човешки фактор, мрежово-центрична среда

**Резюме:** В доклада е разгледана и направена оценка на функционалната ефективност на мултисензорна система за откриване и класификация на безпилотни летателни апарати (БЛА). Структурата е синтезирана по критерии, които осигуряват минимално време за откриване и класификация на целите при висока технико-икономическа ефективност. Класификацията се извършва в реално време с елементи на изкуствен интелект, а адаптацията на моделите за класификация на БЛА е с участието на човешкия фактор.

## MULTISENSOR SYSTEM FOR DETECTION AND CLASSIFICATION OF UAV WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS

**Evgeni Hubenov, Georgi Sotirov, Zoya Chiflidzhanova**

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: zhubenova@space.bas.bg*

**Keywords:** multisensor system, detection and classification, unmanned aerial vehicles, artificial intelligence, human factor, communication and information system, network-centric environment

**Abstract:** This paper discusses and evaluates the functional effectiveness of a multisensor system for detecting and classification of unmanned aerial vehicles (UAVs). The structure is synthesized according to criteria that ensure minimum target detection and classification time with high techno-economic efficiency. The classification is performed in real-time with artificial intelligence elements, and the adaptation of the UAV classification models with the participation of the human factor.

### **Въведение**

Системната цел при защитата от БЛА в случаите на злонамерено използване (тероризъм, защита на критична инфраструктура, охрана) е избор и използване на средства за неутрализация или унищожаване на БЛА. Това изисква откриване на БЛА в рамките на определена зона на отговорност, определяне на пространствено-временните характеристики на обекта (географски координати, височина и скорост на полета), както и разпознаване с цел отнасяне към известен клас за избор на ефективни средства за неутрализация. За защита на военни обекти и обекти на критичната инфраструктура (КИ) всички техническите средства за защита са в единна система, която е съобразена с очакваните цели за неутрализация и поражение и обслужват ограничени географски зони.

Увеличаването на броя на активните БЛА във въздушното пространство налага развитието на мултисензорни системи за откриване и класификация (МСОК) на БЛА по различни демаскиращи признаци. Регулациите в тази област гарантират квалификация и нормативна подготовка на пилотите, но не могат да предотвратят криминални, нерегламентирани или терористични приложения. Това налага МСОК да бъде изградена като комуникационно-

информационна система (КИС), да позволява развитие и включване на различни сензори и да бъде отворена към публично достъпни мрежи за контрол. Резултатите от откриването и класификацията на БЛА трябва да дават възможност за избор при необходимост на средства за неутрализация и поражение и да бъдат достъпни в мрежово-центрична среда. Функциите на мултисензорната система за откриване и класификация на БЛА и нейната адаптация и развитие се осигуряват с инструменти на изкуствен интелект (ИИ) и с участието на човешкия фактор.

### Откриване и класификация на целите

При откриването на БЛА за оценката на условната вероятност за настъпване на събитие, след като е станала известна нова информация, се използва формулата за апостериорната вероятност по теоремата на Бейс (Thomas Bayes). За непрекъснат поток от събития вероятностите за наличие ( $P_A$ ) или отсъствие на цел ( $P_B$ ) определят хипотезите за целта, като пълна система от взаимно изключващи се събития.

$$(1) \quad P(A, B) = 0; \quad P_A + P_B = 1$$

В радиолокационните системи процесите на откриване и класификация на целите са разделени. Откриването на целта на фона на смущения при предположение за съгласувана филтрация зависи от енергията на сигнала по отношение на шума, а функцията на неопределеност на избрания сигнала определя разрешаващата способност по разстояние и скорост. Обемът на разрешение, в който се открива целта, се формира от диаграмата на насочена антена. При наличие на цел с вероятност  $P_A$  са възможни две събития - за правилно откриване с условна вероятност  $P_{TD}$  и за пропуск  $P_{FM}$ . При отсъствие на цел с вероятност  $P_B$  възможните събития са правилно неоткриване с вероятност  $P_{TM}$  и за лъжлива тревога с вероятност  $P_{FA}$ . Системите максимизират вероятността за правилно откриване при фиксирана честота на лъжлива тревога.

В МСОК на БЛА се фиксират множество хипотези  $H = \{H_i\}$  от взаимно изключващи се събития и пълна система от събития за принадлежност на БЛА към даден клас.

$$(2) \quad P(H_i, H_j) = 0; \quad \sum_{i=1}^k P(H_i) = 1$$

Свързването на обекта с известен клас се прави след множество експерименти  $E = \{E_j\}$ ,  $j = 1, \dots, n$ . Събитията  $E_j$  са изключващи се.

$$(3) \quad P(E_j | H_i) \geq 0; \quad \sum_{j=1}^n P(E_j | H_i) = 1$$

$$(4) \quad P(E_j) = \sum_{i=1}^k P(E_j | H_i) \cdot P(H_i)$$

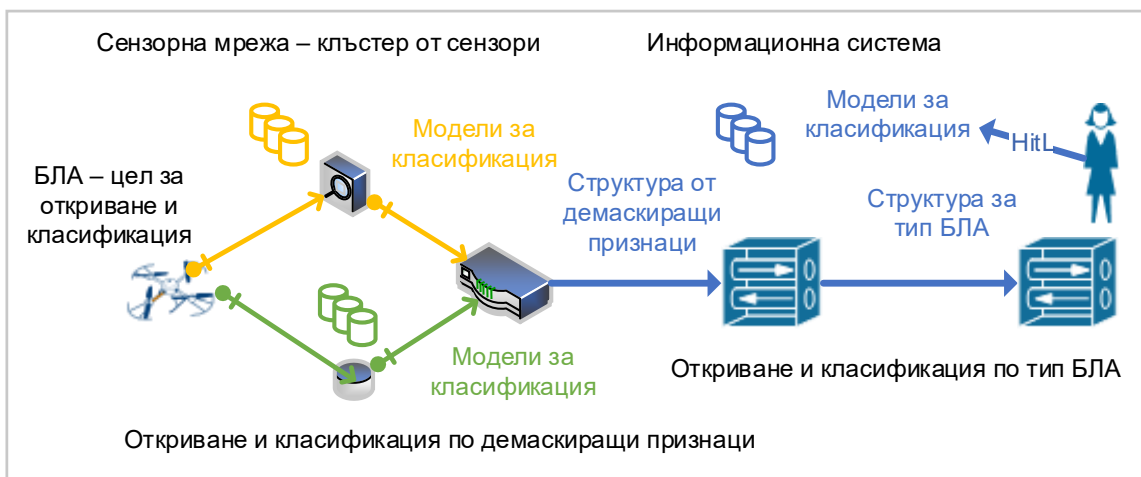
Обектът се отнася към известен клас ако условната вероятност за принадлежността на обекта към даден клас превишава условната вероятност за принадлежността към друг клас [1]. БЛА като обект може да бъде отнесен към различни класове, с различни апостериорни вероятности поради физическата същност на демаскиращите признаци. При паралелна класификация на целите се дефинират класове в пространството на всеки демаскиращ признак и класове в информационното пространство за типове БЛА. Разпознаването означава еднозначно свързване на обекта към един от взаимно-изключващи се класове в информационното пространство на класовете БЛА. Мултисензорната система трябва да осигури като системна цел еднозначно решение за избор и прилагане на средства за неутрализация в известен пространствен обем за определен клас БЛА. Многомерният характер на задачата предполага адаптация и обучение, които са присъщи и са решими с инструменти на ИИ.

Поради различната физическа природа на демаскиращите признаци на БЛА откриването и присъединяването към известен клас се извършва паралелно с данни от едновременно работещи сензори по различни физически признаци. Системата трябва да осигурява интегриране на сензори за различни демаскиращи признаци. Недостатъчната апостериорна информация, която е свързана нерегламентирано използване на БЛА, предполага и налага наличие на възможности за адаптация и обучение както при създаване на моделите, така и при класификацията. При откриване на БЛА вероятността за правилно откриване с оценка на пространствените координати се повишава, ако се използват различни сензори за обема на разрешение. В общия случай сензорите са разположени на различни носители в точки с различни географски координати, както и с различна точност на определяне на обема на откриване.

Особеностите на решението на задачата за откриване и класификация при наличието на повече демаскиращи признаци са аргумент за изграждане на мултисензорната система за откриване и класификация на БЛА като КИС с разпределена обработка на информацията и централизирано управление. Такава структура в мрежово-центрична среда осигурява целта на системата и информационно взаимодействие с други подсистеми, които имат отговорности за въздушното пространство. Информационните потоци трябва да бъдат с транспорт в мрежово-центрична среда, а данните трябва да бъдат форматиращи във вид на информационни обекти. Необходимо условие е възможността за развитие по отношение на сензори и методи за обработка в различни области на системата. Системата трябва да бъде отворена по отношение на други публични информационни системи за контрол и управление на въздушното пространство, които улесняват изпълнението на целите.

### Структурна схема

Предназначението и връзките между отделните подсистеми на МСОК е показано на Фиг. 1. В структурата има две подсистеми за класификация. Първата осигурява откриване и класификация на БЛА по сигнатури на физически признаци в клъстери от сензори за различни демаскиращи признаци (радиочестотен спектър, шумово излъчване, изображение). На изхода на сензорната мрежа от всеки сензор от клъстера се формира структура (вектор) от демаскиращи признаци, специфични за даден клас, към който се добавят данни за пространствено-временните координати на открит БЛА и идентификатор на класа. Моделите за класификация са предварително разработени и са елемент на програмно-апаратната част на сензорния модул, където се извършва откриването и присвояването на клас по демаскиращ признак. Информацията на изхода от всички сензорни модули в рамките на клъстера се обработват с цел визуализация и вземане на решение, осигуряващо системната цел на локално ниво (оперативна употреба на средства за противодействие в зоната на клъстера).



Фиг. 1. Структурна схема на мултисензорна система за откриване и класификация

Във втората система за класификация за данните от сензорите на локалните клъстери се прави предварително централизирано повишаване на точността със съвместяване на данните по пространствено-времеви координати и подобряване на вероятностните характеристики на откриване (по Бейс). Преди класификацията по тип БЛА се извършва групиране, което в практиките на ИИ се разглежда като обучение "без учител". Класификацията се осигурява с инструменти на ИИ. Моделът за класификация осигурява принадлежността на БЛА към определен клас и еднозначно може да се свърже със средствата за неутрализация и противодействие. На всяка открита цел се присвоява уникален идентификатор. Оператор оценява ефективността на откриване, класификация и неутрализация на целите. В модела за класификацията се дава възможност за прилагане на методики за обучение на системата с участие на човешкия фактор ("Human in the Loop", HitL). В режим на реално време (онлайн-режим) хората помагат на модела с прогнози и оценки (например за групов интелект и поведение на БЛА в ято). В офлайн-режим след избор и употреба на средства за противодействие на база на обработените структури човешкият фактор осигурява с оценки развитието на модела за повишаване на достоверността при условия на малка апостериорна информация [2, 3].

## Функционална схема

Информационното взаимодействие предполага изграждането на МСОК на БЛА като КИС [4]. Комплексната разпределена пространствено-временна дискретно-събитийна система включва в структурата си две взаимно-свързани подсистеми (комуникационна и информационна), които са създадени с цел транспорт и обработка на потоци от информационни обекти. Сензорите за демаскиращи признаци на БЛА са групирани в локални клъстери и комуникационно-осигурени в сензорна мрежа. Сензорната мрежа има централен възел, който е шлюз към IP мрежа (Интернет). Изчислителните ресурси в сензорите осигуряват откриване и класификация по демаскиращи признаци. Потоците от информационни обекти от различни сензори, които са групирани в различни клъстери в сензорна мрежа, постъпват за допълнителна обработка с цел информационно осигуряване за използване на средства за неутрализация и поражение съобразени с класа на БЛА. Системните функции на МСОК на БЛА включват съвременно откриване, класифициране, опознаване и следене на събития, свързани с БЛА, включително и от други информационни системи. Целта в информационен план е осигуряване в реално време на ситуационна осведоменост, която да подпомага вземането на решения за прилагане на технически средства за неутрализация. Събитийно-ориентираните КИС включват апаратни и програмни компоненти, които работят едновременно в различни области на взаимно свързани комуникационни среди с използването на събитията в ролята на основен обект за организация на динамичната комуникация между компонентите и адаптиране на структурата към параметрите на потока от данни. Информационните потоци, свързани с мониторинга на БЛА осигуряват взаимодействие с други подсистеми за управление на въздушното пространство [5]. Функционалната схема на МСОК е показана на Фиг. 2.



Фиг. 2. Функционална схема на мултисензорна система за откриване и класификация

Комуникационната свързаност трябва да осигури сигурен транспорт и защита на данните в различни комуникационни среди, което налага използване на технологии за виртуални частни мрежи. На ниво приложения е осигурена свързаност към други информационни системи, осигуряващи контрола на използване на БЛА. Достъпът до данни и изискванията към мрежовата свързаност в МСОК трябва да създават информационна сфера за взаимодействие на различни звена, с крайна цел информационно осигуряване за вземане на решения, свързани с употреба на средства за противодействие или оръжия.

## Мрежово-центрична среда

Мрежово-центричната среда е информационна рамка за взаимодействие (framework) и пълна човешка и техническа свързаност, които позволяват на всички потребители на системата да споделят необходимата информация, когато се нуждаят от нея и във формата, който е необходим за изпълнение на техните функции [6]. Принципите, възможностите и атрибутите на мрежово-центричната среда са разделени в две области: зоната на знанието и техническата област. Мрежово-центричният системен подход определя специфични информационно-структурни характеристики на МСОК в комуникационната подсистема (обща транспортна мрежова среда), зона на сензорите (сензори за преобразуване на физически параметри в данни и сензорна мрежа за достъп) и зона на управление на техническите средства за събиране на данни от сензорите. Задължително е наличие на подсистема за управление и мониторинг на

мрежите и услугите. Всички подсистеми трябва да са достъпни чрез общата транспортна среда. МСОК осигурява услуги за отдалечен достъп до информация и управление на функционалните характеристики на системата, включително нейното управление:

- Услугите са дефинирани и описани с начина за достъп и правата на потребителите и могат да се ползват в произволна точка в адресното пространство на комуникационна среда. За всяко услуга в регистъра на услуги трябва да е определен начинът за достъп, доставчикът на услуги, процесите, които създават услугата и информационните обекти, на които тя се базира.

- Информационните обекти, които доставчиците на услуги ползват трябва да са формирани по общи правила и стандарти и да позволяват повторно използване в други информационни системи или процеси като "строителни блокчета".

- Потребителите на системата трябва да могат да използват услуги от регистъра, а разработчиците на услугите да имат достъп до информационните обекти.

- В системата трябва да е дефинирана и да работи политика и система за информационна сигурност.

- Потребителите на системата трябва да могат да обменят информация и да споделят функционалните ресурси.

- Необходимо е формиране на зони на отговорност и контрол по отношение на създаване, поддържане и ползване на информационните обекти.

Областта на знанието включва когнитивното и социалното взаимодействие, на хората, които са необходими за успешно функциониране в мрежово ориентираната среда. Терминът е свързан с реализация на военна доктрина за информационно осигуряване за задачи и мисии, където съществува строга субординация и дефинирани квалификационни, длъжностни и функционални характеристики на човешкия фактор в индивидуален и групов план. Дефинирани се принципи, които реализират конкурентното информационно превъзходство на средата при запазване на връзките и субординацията във военните звена. Това предполага обобщаването на експертни знания и опит от минали събития, модели и сценарии за действия, които осигуряват вземане на решения. При съвременното състояние на информационните технологии това са задачи на ИИ. Поради тази причина се използва понятието когнитивен (рационално-ментален сегмент или слой). Към него ще отнесем задачите, свързани с адаптацията на МСОК към динамичните условия на средата, развитието на моделите за класификация с участието на човешкия фактор, презентирането на информацията във вид, улесняващ вземане на решения, развитие на сценариите за изпълнение на системните функции, които могат да се реализират без участие на човека, програмните задачи с елементи на ИИ.

Техническата област включва информацията и физическите аспекти (инфраструктура, системи, мрежова свързаност и околна среда). Развитието в двете области е от ключово значение за постигането на функциите на мрежово-центричната среда.

### **Заклучение**

В доклада са представени резултатите от синтез на структура на МСОК на БЛА със системна цел информационно осигуряване за използване на технически средства за ефективна неутрализация на БЛА, която има следните предимства:

- откриване и класификация на целите с мултисензорна система, която подобрява статистическите и точностни характеристики на процеса;

- двустепенна паралелна класификация в реално време по физически характеристики на демаскиращите признаци и по клас БЛА, който клас е свързан еднозначно с избор и решение за ефективното използване на средства за неутрализация;

- използване на изкуствен интелект и развитие на моделите за класификация с използване на човешкия фактор с цел адаптация и създаване на работещи модели с малко количество на данни и качествени прогнози;

- активно обучение на системата с участието на човешкия фактор и аотиране на данните за бърза сходимост на моделите, които са необходими за изпълнение на системните цели;

- дефинирана е структура, която осигурява скалируемост с кълъстерната си организация, разрастване с нови по тип сензори и връзка с други информационни 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 „Проф. Цветан Лазаров“.*

## Литература:

1. Hunt, E., Artificial Intelligence, Academic Press, New York, San Francisco, London, 1975
2. Olusiji O M., Martins Ezuma, Adrian P Lauf, and Ayodeji A Adeniran, Hierarchical Learning Framework for UAV, Detection and Identification, a Air Defence Regiment, Swedish Armed Forces, Sweden Center for Applied Intelligent Systems Research (CAISR), Halmstad University, Halmstad SE 301 18, Sweden c RISE, Lindholmospiren 3A, Gothenburg SE 417 56, Sweden 2012
3. Medaiyese Olusiji O., Abbas Syed, Adrian P. LaufMachine Learning Framework for RF-Based Drone Detection and Identification System, 2021 2nd International Conference On Smart Cities, Automation & Intelligent Computing Systems (ICON-SONICS), pp. 58–64.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9617168>
4. Хубенов, Е., З. Чифлиджанова, Моделиране на процесите в събитийно ориентирани комуникационно-информационни системи, Научно списание „Механика Транспорт Комуникации“, бр. 3, 2013, DS-23-29
5. 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, p-ISSN 2603 – 3313; e-ISSN 2603 – 3321.  
[http://space.bas.bg/SES/archive/SES%202021\\_DOKLADI/PROCEEDINGS%20SES%202021.pdf](http://space.bas.bg/SES/archive/SES%202021_DOKLADI/PROCEEDINGS%20SES%202021.pdf)
6. Net-Centric Environment Joint Functional Concept Department of Defence USA, version 1.0 2005  
<https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA490440.pdf>