

## **Перспективы разработки оптико-радиолокационной системы обнаружения БПЛА**

М.А. Грибанов<sup>1</sup>, М.Д. Валгин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87  
E-mail: maggribanov@ya.ru*

В статье рассматривается проблема обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), представляющих угрозу для безопасности объектов критической инфраструктуры и гражданских зон. Проведён анализ физических принципов и особенностей радиолокационных, оптико-электронных, акустических и радиочастотных методов обнаружения. Особое внимание уделено эффекту «пропеллерной модуляции» (микроДоплера) как ключевому признаку идентификации БПЛА. Предложена структурная схема перспективной мультисенсорной системы обнаружения, интегрирующей данные различных сенсоров на основе методов искусственного интеллекта и федеративного обучения. Приведена сравнительная оценка эффективности методов по вероятностям правильного обнаружения и ложной тревоги в различных условиях.

*Ключевые слова:* малоразмерные БПЛА, обнаружение, радиолокационная станция, микроДоплер, оптическая камера, тепловизор, нейронные сети, мультисенсорная интеграция.

## **Prospects for the development of an optical-radar system for UAV detection**

M.A. Gribanov<sup>1</sup>, M.D. Valgin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Vladimir State University.*

The results of the analysis of modern approaches to the detection of small unmanned aerial vehicles (UAVs) are presented. The limitations of single-sensor systems such as radar stations (radars) and optoelectronic systems (OES) are considered. The prospects of developing a hybrid optical-radar system implementing a late data fusion strategy at the trajectory processing level are substantiated. It is shown that the integration of heterogeneous means reduces the probability of false alarm and increases the reliability of detection in difficult weather conditions due to the synergistic effect.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, radar, optoelectronic system, integration, multisensor systems, target detection.

The paper addresses the problem of detecting small unmanned aerial vehicles (UAVs) that pose a threat to the security of critical infrastructure and civilian areas. An analysis of the physical principles and features of radar and optoelectronic detection methods is carried out. Special attention is paid to the "propeller modulation" effect (micro-Doppler) as a key feature for UAV identification. The promise of integrating radar and optical channels is substantiated. A structural diagram of an optical-radar detection system integrating sensor data based on artificial intelligence methods is proposed. A comparative evaluation of the methods' efficiency in terms of probability of correct detection and false alarm rate under various conditions is presented.

## **Введение**

Стремительное развитие беспилотных авиационных систем привело к их широкому распространению не только в военной, но и в гражданской сфере. Доступность, простота управления и относительно низкая стоимость сделали малые беспилотные летательные аппараты (БПЛА) популярными среди самых разных категорий пользователей. Однако

наряду с очевидными преимуществами массовое использование БПЛА породило серьезные проблемы в области безопасности [1, 2].

Малые БПЛА способны выполнять полёты на низких высотах с невысокими скоростями, что в сочетании с их миниатюрными размерами и использованием композитных материалов с низкой отражающей способностью делает их труднообнаружимыми для традиционных радиолокационных систем [3, 4]. Особую остроту проблема приобретает в контексте обеспечения безопасности критически важных объектов инфраструктуры, аэропортов, мест массового скопления людей, а также пресечения противоправной деятельности [5, 6].

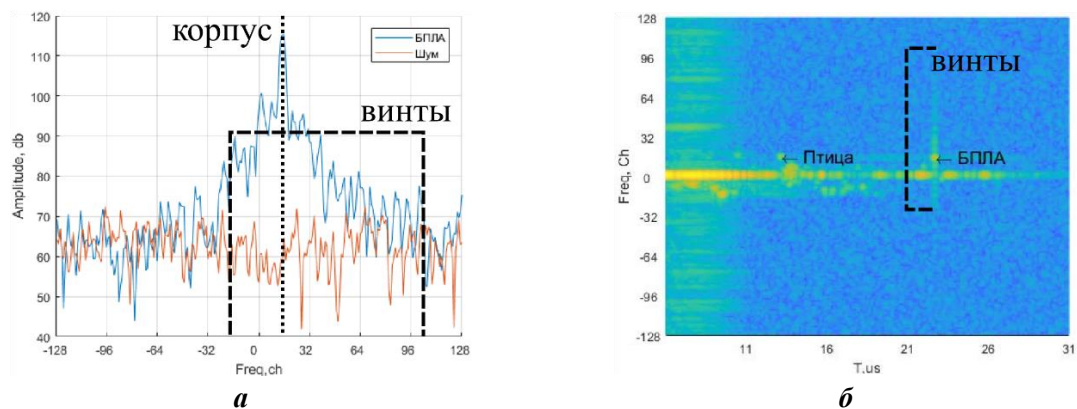
В связи с этим разработка эффективных систем обнаружения, способных своевременно идентифицировать несанкционированное проникновение малых БПЛА в контролируемое воздушное пространство, становится одной из приоритетных задач. Сложность решения этой задачи обусловлена необходимостью не только обнаружить объект, но и надёжно отличить его от других летающих объектов, присутствующих в приземном слое, в первую очередь от птиц, которые могут иметь схожие радиолокационные и траекторные характеристики [3, 7].

Перспективным направлением повышения эффективности обнаружения является комплексирование различных методов, в частности, радиолокационного и оптико-электронного. Радиолокационные системы обеспечивают всепогодное обнаружение на больших дальностях, а оптические – высокоточную идентификацию типа цели на ближних рубежах [8]. Настоящая работа посвящена анализу возможностей и перспектив разработки оптико-радиолокационной системы обнаружения БПЛА, интегрирующей данные разнородных сенсоров на основе современных технологий обработки информации.

### **Методы обнаружения беспилотных летательных аппаратов**

Основными методами обнаружения летательных аппаратов являются радиолокационный, оптический (оптико-электронный) и акустический.

Одним из главных ограничений при радиолокационном обнаружении БПЛА является величина ЭПР, составляющая менее  $0,01 \text{ м}^2$  [4, 9]. Однако, как показано в [3], при использовании РЛС S-диапазона (2,7–2,8 ГГц) возможно уверенное выделение отраженного сигнала от БПЛА на фоне фоновых шумов и других объектов на расстоянии до 7 км. Это связано с наличием у БПЛА вращающихся винтов, создающих дополнительные модуляционные составляющие вокруг отражения от корпуса. Как показывает анализ рис. 1а, для квадрокоптера DJI Phantom 3 при ширине зондирующего импульса 10 мкс и скважности импульсов, равной 20 [3], отраженный от корпуса сигнал соответствует доплеровской частоте 12 Гц, а в полосе доплеровских частот  $-16 \dots 108$  Гц наблюдается спектр, характерный для отражения радиолокационного сигнала от передней и задней кромок лопастей воздушного винта. Асимметрия отраженного от винтов сигнала связана с направлением их вращения, частота определяется скоростью вращения, а амплитуда зависит от размеров воздушных винтов, дальности до объекта и ракурса. Такой эффект «пропеллерной модуляции» также проявляется на доплеровской спектрограмме (рис. 1б). Анализ данных, представленных на рисунке, показывает, что для БПЛА, в отличие от других летающих объектов, например, птиц, наблюдается сигнал, отраженный от вращающихся винтов.



**Рис. 1. Спектрограммы сигналов, отраженных от квадрокоптера DJI Phantom 3 [3]: а – амплитуда отраженного сигнала в зависимости от доплеровской частоты; б – доплеровская спектрограмма**

Также отмечено, что эффект «пропеллерной модуляции» наблюдается и у БПЛА самолетного типа, например, *SenseFly eBee*. Однако, при определенных ракурсах происходит затенение винта корпусом, что приводит к исчезновению соответствующих гармоник на спектрограммах.

В основе оптико-электронных методов обнаружения БПЛА лежит анализ электромагнитного излучения как в оптическом, так и в инфракрасном (ИК) диапазонах [1, 10].

Тепловизионные камеры фиксируют инфракрасное излучение объекта. Они эффективны в условиях плохой видимости и ночью, но их чувствительность ограничена малой тепловой сигнатурой современных БПЛА с электрическими двигателями [5].

Оптические камеры видимого диапазона могут работать в двух режимах:

активный - использование дополнительной подсветки и стереоскопического анализа для повышения точности, что требует значительных энергозатрат [5];

пассивный - анализ контраста объекта по сравнению с фоном, точность метода снижается в сумерках, при ярком солнце или в сложных метеоусловиях.

Интеграция данных с тепловизоров и оптических камер позволяет частично компенсировать недостатки каждого из методов. В [10] описан алгоритм мультиспектрального комплексирования телевизионных и тепловизионных изображений на основе вейвлет-преобразования, позволяющий существенно улучшить восприятие оператором в сложных условиях.

Эффективность радиолокационного и оптико-электронных методов обнаружения БПЛА оценивается либо вероятностью правильного распознавания  $D$ , либо вероятностью ложной тревоги  $F$ . В табл. 1 приведены экспертные оценки этих показателей для различных методов в зависимости от условий наблюдения, обобщенные на основе анализа ряда источников [1, 3, 5, 7, 9, 15].

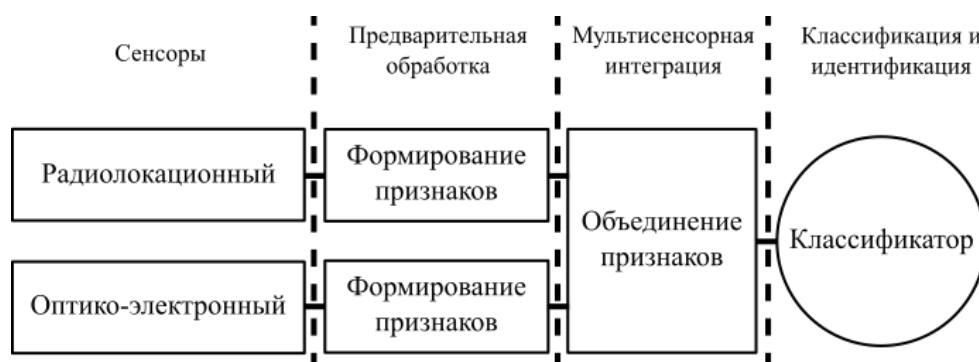
Анализ представленных в табл. 1 данных показывает, что вероятность правильного обнаружения БПЛА для всех методов в идеальных условиях составляет 0,75...0,95. Однако, в условиях ограниченной или недостаточной видимости вероятность ложной тревоги возрастает до 0,30...0,60. При этом, радиолокационные системы, обеспечивая всепогодное обнаружение на больших дальностях, зачастую не могут достоверно классифицировать тип цели, особенно при малых значениях ЭПР [4, 8]. Оптико-электронные системы, напротив, позволяют точно идентифицировать объект, но их эффективность резко падает в условиях плохой видимости и на больших дальностях [5, 8]. Поэтому, с целью увеличения вероятности правильного обнаружения БПЛА, можно предложить комплексирование радиолокационного и оптико-электронного каналов в

составе единой системы, что позволит компенсировать недостатки каждого из методов: радиолокатор обеспечивает круговой обзор и обнаружение на больших дистанциях, а оптическая система точное распознавание и сопровождение на ближних подступах [8, 11], что особенно актуально для защиты периметров объектов, где требуется как раннее предупреждение, так и подтверждение факта угрозы.

**Таблица 1. Сравнительная эффективность методов обнаружения БПЛА**

Метод обнаружения	Условия	Вероятность правильного обнаружения (D)	Вероятность ложной тревоги (F)
Радиолокационный	Чистое небо, прямая видимость	0,90...0,95	0,05...0,10
	Городская застройка	0,70...0,80	0,20...0,30
Оптический (видимый диапазон)	Хорошее освещение, чистый фон	0,85...0,90	0,10...0,15
	Сумерки, дымка	0,50...0,60	0,40...0,50
Тепловизионный (ИК – диапазон)	Ночь, холодный фон	0,75...0,85	0,15...0,25
	Жаркий климат, нагрев фона	0,40...0,50	0,60...0,50

Структурная схема комплексной оптико-радиолокационной системы обнаружения БПЛА приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Структурная схема комплексной оптико-радиолокационной системы обнаружения БПЛА**

Комплексная оптико-радиолокационная система обнаружения БПЛА включает в свой состав четыре уровня обработки:

1. Уровень сенсоров: информация от радиолокационного канала (обнаружение, дальность, скорость, доплеровская спектрограмма и т.п.) и оптико-электронного канала (ТВ/ИК-изображения) поступает в систему.

2. Предварительная обработка: на этом этапе происходит фильтрация шумов, нормализация данных, выделение первичных признаков. Для сглаживания траекторных параметров, получаемых от РЛС, может применяться фильтр Калмана [13].

3. Мультисенсорная интеграция (с использованием ИИ): ключевой блок системы. Обработанные данные двух модальностей объединяются. Для этого используется архитектура глубокого обучения (например, комбинация CNN для обработки изображений и рекуррентных слоёв для анализа доплеровских спектров), позволяющая эффективно находить корреляции между данными [5, 14]. Задачей этого блока является верификация целей, обнаруженных радиолокатором, и их точная классификация по оптическому изображению.

4. Классификация и идентификация: Интегрированные признаки сопоставляются с базами данных и знаний. Выходом системы является решение о наличии БПЛА, его типе и степени угрозы.

Для автоматической классификации обнаруженного объекта на уровне классификатора система должна обладать базой знаний. Она включает в себя [1, 12]: библиотеки эталонных доплеровских портретов для различных типов БПЛА (квадрокоптеры, коптеры, самолётного типа) при разных ракурсах; базы данных силуэтов и геометрических характеристик, получаемых с оптических камер; библиотеки спектральных сигнатур радиосигналов управления и передачи данных; акустические сигнатуры для различных моделей дронов [7].

База знаний используются для как для обучения и дообучения нейросетевых классификаторов, таких как сверточные нейронные сети (CNN) для обработки изображений и трансформеры для анализа последовательностей данных [5, 10], так и для увеличения точности распознавания в процессе работы комплексной системы обнаружения БПЛА.

### **Оценка эффективности методов обнаружения**

Как было отмечено выше, комплексирование радиолокационного и оптического методов в рамках единой системы позволяет увеличить вероятности правильного обнаружения и минимизировать уровень ложной тревоги за счет взаимной компенсации недостатков отдельных методов [8, 11, 13].

Количественная оценка эффективности комплексирования может быть выполнена на основе теории статистических решений. Если рассматривать обнаружение в двух независимых каналах с вероятностями правильного обнаружения  $P_{D1}$  и  $P_{D2}$ , то при использовании логического правила «И» (тревога фиксируется при срабатывании обоих датчиков) вероятность ложной тревоги равна

$$P_{F\Sigma} = P_{F1} \cdot P_{F2}.$$

Поскольку  $P_{F1}$  и  $P_{F2}$  обычно являются величинами малого порядка, комплексная оптико-радиолокационная система обнаружения БПЛА обеспечивает высокую степень защиты от ложных срабатываний. Это особенно важно при работе в условиях интенсивных помех от городской застройки или большого количества птиц.

При использовании правила «ИЛИ»

$$P_{D\Sigma} = P_{D1} + P_{D2},$$

для обеспечения высокой вероятности обнаружения в сложных условиях (например,  $P_{D1}=0,7$  для РЛС в условиях сильных отражений от местности и  $P_{D2} = 0,99$  для ОЭС в ясную погоду) общая вероятность обнаружения системы стремится к единице  $P_{D\Sigma} = 0,997$ .

В целом, комплексная оптико-радиолокационная система позволит обеспечить достижение вероятности правильного обнаружения БПЛА в пределах  $D = 0,93 \dots 0,98$  и ложного срабатывания  $F = 0,02 \dots 0,07$ , независимо от условий окружающей среды, что превосходит точность работы радиолокационного и оптико-электронного оборудования по отдельности.

### **Заключение**

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что использование для обнаружения БПЛА радиолокационных или оптико-электронных методов по отдельности ограничено условиями окружающей среды и не может обеспечить максимальную эффективность. Наиболее перспективным направлением совершенствования систем обнаружения БПЛА является создание комплексных оптико-радиолокационных систем, интегрирующих данные радиолокации (с анализом

доплеровского портрета) и оптико-электронных средств (телевизионных и тепловизионных каналов). Применение методов искусственного интеллекта для совместной обработки данных позволит создать адаптивную и высоконадежную систему, способную решать задачи раннего обнаружения и точной классификации БПЛА. Предложенная структурная схема и сравнительная оценка эффективности подтверждают перспективность дальнейших исследований и разработок в данном направлении.

### Литература

1. Мартыненко А.А., Борисов И.С. Методы обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Актуальные исследования. – 2025. – № 21 (256). – Ч. I. – С. 1-9.
2. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. – М.: Стратегические приоритеты, 2016. – 676 с.
3. Шестаков Н.В. Исследование радиолокационных отражений от беспилотных летательных аппаратов с малой эффективной поверхностью рассеяния // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2022. – Вып. 2. – С. 402-408.
4. Ратушняк В.Н., Дмитриев Д.Д., Мекаев А.М. К вопросу об обнаружении малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов обзорными радиолокационными станциями // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18, № 2. – С. 258-270.
5. Митрофанов Д.Г., Шишков С.В. Инновационный подход к вопросу обнаружения малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 1 (195). – С. 28-40.
6. Филин Е.Д., Киричек Р.В. Методы обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на основе анализа электромагнитного спектра // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 87-93.
7. Красненко Н.П., Богушевич А.Я., Кураков С.А., Раков А.С., Рыбаков И.А. Обнаружение беспилотных летательных аппаратов: существующие решения и возможности // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром, 2024. – С. 429-440.
8. Кузмичев А.А., Кузмичев А.А. Наземные методы детектирования беспилотных летательных аппаратов // Актуальные исследования. – 2025. – № 21 (256). – Ч. I. – С. 70-75.
9. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В. Особенности обнаружения и распознавания малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. – 2018. – № 195. – С. 235-243.
10. Бондаренко В.А., Каплинский Г.Э., Павлова В.А., Тупиков В.А. Алгоритмическое обеспечение оптико-электронных систем комплекса защиты объектов от беспилотных летательных аппаратов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 11. – С. 15-27.
11. Годунов А.И., Шишков С.В., Юрков Н.К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 2 (6). – С. 62-70.
12. Сенцов А.А., Иванов С.А., Ненашев С.А. Возможности интеграции устройств в составе беспилотных летательных аппаратов при оперативном мониторинге земной поверхности // Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах: сб. докл. Междунар. науч. конф. – СПб.: ГУАП, 2021. – С. 117-122.
13. Карташов В.М., Олейников В.Н., Рябуха В.П., Бабкин С.И., Воронин В.В., Капуста А.И., Селезнев И.С. Методы комплексной обработки и интерпретации

радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. – 2020. – Вып. 202. – С. 172-182.

14. Hartmann F., Rojas R. Federated learning // Freie Universität Berlin. – 2018.

15. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 3-7.