

УДК 623.746.4-519;621.384.3;621.396.969.3;621.396

doi: 10.53816/23061456_2025_11-12_43

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR DETECTION UNMANNED AERIAL VEHICLES

В.А. Прохоров, С.Н. Васильева, Л.А. Бацта, Ю.П. Крылов

V.A. Prokhorov, S.N. Vasilieva, L.A. Bashta, Y.P. Krylov

НПО Спецматериалов

Статья посвящена исследованию и сравнительному анализу методов обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), используемых различными странами. Рассмотрены оптические, акустические, радиолокационные, инфракрасные и электромагнитные системы наблюдения, применяемые для своевременного выявления БПЛА. Проведена оценка эффективности методов обнаружения БПЛА, выявлены их преимущества и недостатки. Рассмотрены примеры современных систем обнаружения БПЛА, представленные на зарубежном рынке, а также системы, на данный момент не стоящие на снабжении армий. Особое внимание удалено перспективным комплексным направлениям развития технологий защиты объектов инфраструктуры от угроз, связанных с использованием малозаметных БПЛА террористическими организациями.

Ключевые слова: БПЛА, летательные средства, противодействие БПЛА, обнаружение БПЛА, радиолокационные системы.

The article is devoted to the study and comparative analysis of various methods of detecting unmanned aerial vehicles (UAVs) used by different countries. Optical, acoustic, radar, infrared, and electromagnetic surveillance systems are considered, which are used for the timely detection of unauthorized UAVs. The effectiveness of UAV detection methods was evaluated, and their advantages and disadvantages were identified. Examples of modern UAV detection systems available on the foreign market are considered, as well as systems that are not currently in service with the armies. Special attention is paid to promising integrated directions of development of technologies for protecting infrastructure facilities from threats associated with the use of stealthy UAVs by terrorist organizations.

Keywords: UAV, aircraft, UAV countermeasures, UAV detection, radar systems.

Введение

Ввиду роста числа гражданских и военных БПЛА значительно увеличились риски безопасности объектов гражданской и военной инфраструктуры [1, 2]. Представители террористических организаций активно используют компактные БПЛА с целью реализации терактов с

использованием взрывчатых веществ, сбора разведывательной информации и психологического воздействия на население. Эффективность существующих мер защиты существенно зависит от точности и быстроты обнаружения воздушных целей малых размеров и низкой заметности.

Задача своевременного обнаружения БПЛА становится особенно актуальной ввиду их ма-

лой отражающей способности, малого уровня шума и относительно медленного движения, что затрудняет их обнаружение традиционными средствами противовоздушной обороны (ПВО). Поэтому становится перспективной разработка новых подходов, а также повышение чувствительности имеющихся технических решений.

Наиболее распространенными методами обнаружения БПЛА являются:

- радиолокационный;
- оптико-электронный;
- инфракрасный;
- акустический;
- электромагнитный.

Каждый из указанных методов имеет определенные ограничения и особенности применения.

Радиолокационный метод обнаружения БПЛА

Радиолокационный метод подразумевает использование специализированных радиолокационных систем (РЛС) для обнаружения воздушных объектов путем излучения радиоволн и приема их отражений. Как правило, к современным РЛС относятся крупные радиолокационные станции или мобильные комплексы [3], способные эффективно обнаруживать цели с большой площадью рассеивания на расстоянии до нескольких сотен километров. Однако малые размеры БПЛА приводят к слабым сигналам обратного рассеяния, поэтому для эффективного мониторинга территорий вблизи стратегических объектов часто применяются маловысотные радары, способные отслеживать низкоскоростные объекты с небольшой эффективной площадью рассеивания. Для обнаружения подобных БПЛА применяются компактные переносные станции с рабочей областью до 2–3 км [4].

Несмотря на перспективность использования радиолокационного метода обнаружения, он несет в себе ряд недостатков, одним из которых является многомерная обработка радиосигналов, на которые влияют не только элементы рельефа местности, но также и погодные условия.

В работе [5] показано, что обнаружение средствами радиолокационной разведки (РЛР) является эффективным в том случае, когда радиолокационная заметность цели соответствует

разрешающей способности РЛС. Показателем радиолокационной заметности цели является ее эффективная площадь рассеяния (ЭПР):

$$\sigma = \frac{\xi P_{\text{отр}}}{E_1} = \frac{\xi D_0 P_{\text{пач}}}{E_1} = \xi S D_0, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент деполяризации вторичного поля ($0 \leq \xi \leq 1$);

$P_{\text{отр}}$ — мощность отраженного от цели сигнала;

E_1 — плотность потока энергии радиолокационного сигнала на сфере радиусом равным дальности до цели;

D_0 — значение диаграммы обратного рассеяния в направлении на РЛС;

S — полная площадь рассеяния цели.

Несмотря на то, что показатель ЭПР имеет размерность м^2 , он не является геометрической площадью, а является энергетической характеристикой, то есть представляет собой коэффициент, который учитывает отражающие свойства цели и зависит от пространственной конфигурации цели, электрических свойств ее материала и отношения линейных размеров цели к длине волны. В радиолокационных задачах распознавания и классификации целей обычно пользуются радиолокационным портретом воздушной цели (так называемой сигнатурой), который связан с геометрическими, физическими и кинематическими свойствами цели.

Согласно данным работы [6] составлена табл. 1, в которой приведены оценочные дальности, на которых РЛС могут обнаружить малые БПЛА (МБПЛА) в зависимости от их ЭПР и диапазона используемых частот.

Таблица 1
Потенциальные возможности обнаружения РЛС МБПЛА

Диапазон	ЭПР МБПЛА, кв. м.	Дальность обнаружения, км
Метровый	0,1	8–14
	0,01	0,1–1,5
Дециметровый	0,1	9–16
	0,01	0,8–2
Сантиметровый	0,1	12–25
	0,01	1,4–2,8

Из значений табл. 1 можно увидеть, что оценочные дальности, на которых РЛС войсковых частей ПВО [7], могут обнаружить МБПЛА с ЭПР $0,1 \text{ м}^2$, почти совпадают с реальными данными испытаний, чего нельзя сказать о МБПЛА с ЭПР $0,01 \text{ м}^2$, где реальные дальности стремятся к нулевым показателям. Утверждается, что для средств ПВО цели с ЭПР $\approx 0,01 \text{ м}^2$ и меньше вообще не обнаруживаются.

Большой популярностью среди РЛС для выявления БПЛА также пользуются американские загоризонтные радиолокаторы Wide Aperture Research Facility (WARF), Relocatable Over-the-Horizon Radar (ROTHR).

WARF представляет собой высокоразрешающую бистатическую высокочастотную радиолокационную систему, расположенную на двух крупных полевых площадках в центральной долине Калифорнии. Передатчик WARF находится недалеко от Лос-Хиллз, а приемник — недалеко от Лос-Банос. На WARF проводили испытания технологии дальнего обнаружения и слежения, которая стала основой оперативных программ загоризонтных радиолокаторов для BBC США, ВМС США и правительства Австралии.

Радар ROTHR применяется ВМС США и работает по принципу бистатического ионосферного обратного рассеяния для наблюдения за обширной территорией. Радарная система была разработана ВМС США при содействии Raytheon. В настоящее время используются три системы ROTHR: в Вирджинии, Техасе и Пуэрто-Рико. Радар может использовать различные полосы пропускания.

Радиолокационные системы обычно интегрируются в более крупные комплексы радиоэлектронной борьбы, такие как система радиолокационного наблюдения AN/APY-7 в платформе Joint Surveillance Target Attack Radar System (JSTARS). Набор систем JSTARS включает в себя защищенные коммуникационные технологии для обмена информацией с другими платформами разведки, наблюдения и рекогносцировки [8].

Оптико-электронный метод обнаружения БПЛА

Оптико-электронный метод предполагает использование видеокамер высокого разрешения, которые могут визуально зафиксировать

объект в условиях ограниченной видимости. Примерами оптико-электронных систем могут служить следующие разработки: израильские электрооптические системы DefenSync, оптоэлектронное устройство идентификации и слежения БПЛА Zhejiang Fanshuang Technology Co., Ltd.

В системах DefenSync используются передовые электрооптические камеры, которые точно определяют положение БПЛА на основе их визуальных и температурных характеристик. Датчики системы легко интегрируются с другими технологиями, что позволяет сводить к минимуму ложные обнаружения.

Устройство, разработанное Zhejiang Fanshuang Technology Co., Ltd, объединяет в себе камеры видимого света высокой четкости, охлаждаемые/неохлаждаемые тепловизионные камеры, лазерные осветители и различные модули обнаружения спектра. Обеспечивает автоматическое слежение, интеллектуальный анализ и прецизионное электронное управление. Отличается компактной и скрытной конструкцией. Устройство может взаимодействовать с подсистемами наблюдения связи и подсистемами обнаружения радаров. Оно имеет алюминиевый корпус сферической конструкции, устойчивый к сильному ветру и вибрациям [9].

Инфракрасный метод обнаружения БПЛА

Инфракрасный метод для обнаружения БПЛА использует инфракрасные камеры, которые обеспечивают эффективное обнаружение БПЛА за счет фиксации тепла, выделяемого двигателем и электроникой аппарата. Эти датчики регистрируют изменения температуры в зоне обзора и формируют тепловую карту окружающего пространства. Поскольку большинство современных БПЛА имеют двигатели внутреннего сгорания или электрические моторы, которые нагреваются при работе, ИК-датчики оказываются крайне полезными для выявления нарушителей.

Для увеличения вероятности успешного обнаружения применяют высокоточные инфракрасные камеры, способные различать незначительные температурные различия на значительных расстояниях.

Например, американский производитель FLIR Systems предлагает широкую линейку

ИК-камер, специально предназначенных для систем защиты от БПЛА. Модели FLIR Boson обеспечивают четкое распознавание теплых зон даже в темноте или неблагоприятных погодных условиях, имеют 2 матрицы на выбор: с разрешением 640×512 или 320×256 пикселей, и искусственный интеллект. Тепловизионный модуль оснащен многоядерным видеопроцессором с низким энергопотреблением (500 мВт) и работает под управлением масштабируемой архитектуры обработки тепловизионного видео [10].

Еще одним примером высокоточной камеры для выявления БПЛА является разработка Sierra-Olympia — Ventus HD6-0.6. Камера отличается возможностями встроенного кодирования видео и расширенной обработкой изображений, что позволяет интегрировать ее в высокопроизводительные системы видеонаблюдения. Основные характеристики камеры: 1,2 Мп, частота кадров от 30 до 60 Гц, диапазоном длин волн от 3 до 5 мкм. Благодаря 14-кратному оптическому зуму в формате матрицы 1280×960 эта камера может обнаруживать, распознавать и идентифицировать БПЛА на больших расстояниях.

Самое высокое разрешение представленных на рынке решений имеют камеры SPYNEL-X: $23\,000 \times 1280$ — для модели 3500, $46\,000 \times 1280$ — для модели 6000, $92\,000 \times 1280$ — для модели 8000. SPYNEL-X, показанная на рис. 1 — это панорамная инфракрасная пассивная камера, которая может заменить до 90 HD MWIR-камер. Камера модели 3500 позволяет определить объект размером с человека на расстоянии до 2,5 км,



Rис. 1. Инфракрасная камера SPYNEL-X

объект размером с легковой автомобиль на расстоянии до 5 км, для модели 6000 эти параметры равны 5 и 9 км, а для модели 8000 — 9 и 12,5 км, соответственно [11].

Стоит отметить, что современные микро-БПЛА могут иметь небольшую тепловую эмиссию, что усложняет их обнаружение инфракрасным методом.

Акустический метод обнаружения БПЛА

Акустический метод основан на регистрации звуков, издаваемых двигателями и винтами БПЛА. Массивы микрофонов размещают на местности вокруг защищаемого объекта. Направление и скорость приближающегося БПЛА определяется по задержке звуковых волн между датчиками. Для выявления аномалий и распознавания образов для обучения алгоритма опорных векторов, позволяющего классифицировать БПЛА на фоне шума, используется частотный анализ на основе преобразования Фурье.

Примером разработок является Acoustic Drone Detector Squarehead Technology. Датчик Discovair CUAS/C-UAS обнаруживает и отслеживает (до 65 дБ на расстоянии до 500 м) беспилотники I и II класса (к первому классу беспилотников относятся БПЛА гражданско-бытового назначения, например, DJI Phantom, DJ Mavic и DJ Matrice; второй класс — специализированные БПЛА, которые разрабатываются и поставляются в интересах специальных государственных служб и ведомств; к этому классу относится, например, мультикоптер R.A.L. X6T) с помощью передовых алгоритмов машинного обучения.

Каждый датчик имеет угол обзора в 105 градусов, отслеживая акустические изменения в сети постоянно контролируемых секторов. Несколько датчиков могут быть объединены вместе для покрытия горизонта в 360 градусов. Любое изменение звука в акустическом секторе запускает акустические лучи высокого разрешения, которые собирают звук этого изменения. Затем система анализирует эту информацию и классифицирует БПЛА. Обученная модель позволяет определять по звуку, является ли летательный аппарат вертолетного типа или самолетного. Для работы в автономном режиме и получения данных с датчика и их дальнейшей визуализации необходимо любое устройство с дисплеем и

поддержкой браузера. При обнаружении БПЛА сигнал тревоги вместе с точным направлением на цель передается на экран оператора или в систему, подключенную к API.

Чувствительность датчиков акустических систем ограничена расстоянием до БПЛА и погодными условиями (ветром, дождем). Кроме того, производители БПЛА стремятся уменьшить уровень шума, создавая бесшумные двигатели и облегченные материалы конструкций, что снижает возможность акустического обнаружения некоторых классов БПЛА [12].

Электромагнитный метод обнаружения БПЛА

Основной принцип работы электромагнитного метода заключается в перехвате радиоуправляющих сигналов, GPS-позиционирования и сигналов связи БПЛА с оператором, что позволяет обнаружить и определить местоположение объекта. К дополнительным особенностям метода можно также отнести возможность подавлять каналы управления и осуществлять захват контроля над вражеским БПЛА.

Выделяют две основные категории оборудования, работающего с применением электромагнитного метода: пеленгаторы и декодеры радиочастотных сигналов. Пеленгаторы имеют антенны и внутренние датчики для обнаружения сигнала управления или канала передачи данных. Обычно для обнаружения одного БПЛА требуется сеть из минимум трех пеленгаторов. Декодеры радиочастотных сигналов извлекают информацию о БПЛА непосредственно из данных его системы, а не из его радиочастотных излучений. Они также бывают двух видов. Первые представляют собой запатентованные системы, которые производители БПЛА разрабатывают исключительно для работы с их собственными моделями. Например, декодеры RF DJI Aeroscope обнаруживают сигналы управления от любого БПЛА DJI (рис. 2). При этом радиус действия мобильной системы составляет 3–5 км, а стационарной версии возрастает до 30–35 км [13].

Второй тип декодера RF не ограничивается определенными марками и моделями. Вместо этого они используют обратную разработку для взлома шифрования на канале передачи данных, который соединяет БПЛА с его центром управ-

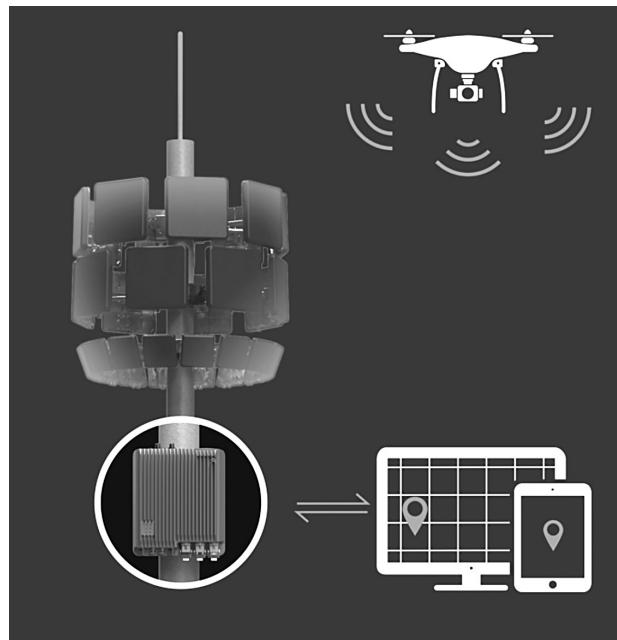


Рис. 2. Работа декодера радиочастотных сигналов

ления. Отдельные декодеры сигналов обеспечивают лучшее покрытие, чем пеленгаторы, а это значит, что нет необходимости развертывать их как часть массива для точного обнаружения активности БПЛА.

Примером систем, основанных на электромагнитном методе, могут служить лидирующие на рынке радиочастотные датчики Dedrone Sensors. Они могут по радиосигналу обнаружить БПЛА, выявить его местоположение, а также определить производителя и/или модель. Например, версия RF-560 способна определять БПЛА на расстоянии до 10 км при работе на частотах 2,4 ГГц, 5,2 ГГц и 5,5 ГГц [14].

Еще один пример — анализатор спектра реального времени SM200C от Signal Hound, работающий с широким диапазоном частот от 100 кГц до 20 ГГц, мгновенной полосой пропускания 160 МГц, скоростью развертки в терагерцовом диапазоне, оптоволоконным интерфейсом и встроенным GPS [15]. Устройство улавливает радиочастоты БПЛА (2,4 ГГц, 5,2 ГГц, 900 МГц, 433 МГц) и позволяет определить его местоположение. Стоит отметить, что при использовании нескольких анализаторов можно триангулировать сигнал и обнаружить местоположение как БПЛА, так и оператора практически одновременно. Рабочая дальность SM200C составляет примерно 2–3 км.

Хотя метод на основе радиочастот считается высокоэффективным для обнаружения БПЛА, существуют некоторые проблемы с использованием этого подхода. Одна из них заключается в том, что чем более загружен спектр, тем сложнее идентифицировать интересующие сигналы. Избирательность приемника является ключевым свойством при анализе переполненного спектра [16].

Для комплексного рассмотрения преимуществ и недостатков каждого метода, они были сведены в табл. 2.

Анализ методов обнаружения показал, что применять методы по отдельности нецелесо-

образно, требуется разрабатывать и использовать комплексные решения. Именно по этой причине большинство современных систем представляют собой интегрированные комплексы, объединяющие несколько методик одновременно. Это позволяет компенсировать слабые стороны каждой отдельной технологии и значительно повысить общую надежность обнаружения. Комплексные системы обладают высокой степенью автоматизации и способностью быстро реагировать на потенциальные угрозы.

Примером успешной реализации комплексного подхода служит система защиты от БПЛА

Таблица 2

Преимущества и недостатки методов обнаружения БПЛА

Характеристика	Метод				
	радиолокационный	оптико-электронный	инфракрасный	акустический	электромагнитный
Определение координат цели с высокой точностью	+	-	-	-	+
Обнаружение в сложных погодных условиях	+	-	-	-	+
Может опознавать малоразмерные низколетящие БПЛА	-	+	+	-	+
Высокое разрешение получаемых изображений	не получает изображения	+	+	не получает изображения	не получает изображения
Дальность действия	высокая	средняя	средняя	низкая	высокая
Нагрузка на вычислительное оборудование	-	-	+	-	-
Идентификация отдельных БПЛА	-	+	+	-	+
Простота эксплуатации	-	+	+	+	+
Возможность блокировки канала управления	-	-	-	-	+
Уязвимость перед шифрованными каналами связи	-	-	-	-	+
Необходимость интеграции с другими системами для полной надежности	-	-	-	-	+

Anti-UAV Defence System (AUDS) [17], разработанная тремя британскими компаниями. Она объединяет в себе метод радиолокационного электронного сканирования, электронно-оптического сопровождения/классификации и направленного подавления радиочастот. AUDS способна дистанционно обнаруживать небольшие БПЛА, а затем отслеживать и классифицировать их, после чего непосредственно в системе предусмотрено устройство их уничтожения.

Команда AUDS объединяет три британские компании, обладающие возможностями для создания эффективной системы противодействия БПЛА. Радары серии Blighter A400 (рис. 3), способны обнаруживать небольшие БПЛА в любых погодных условиях. Разворачиваемая система и видеотрекер EO от Chess Dynamics Hawkeye, оснащены цветной камерой дальнего действия и высокочувствительным тепловизором, а также современной технологией видеослежения. В сочетании с информацией с радара о цели они способны отслеживать и классифицировать ее. При необходимости оператор по запросу может использовать интеллектуальный радиочастотный ингибитор Enterprise Control Systems для подавления определенных каналов управления БПЛА и, тем самым, вывести его из строя.

Другой пример: китайская система обнаружения и отслеживания дронов на основе комбинированных акустических и оптических подходов разработки [18]. Разработчики предлагают мультимодальную систему для задач обнаружения небольших БПЛА, которая объединяет в своей конструкции микрофонную решетку, камеру и лидар и применяет стратегию локализации от грубой к точной. Стратегия «от грубой к точной» заключается в том, что как только БПЛА попадает в зону досягаемости, излучаемый акустический шумовой сигнал улавливается микрофонной решеткой. С помощью предлагаемого алгоритма локализации источника звука, определяется приблизительное местоположение цели. Одновременно с этим карданный подвес устройства обнаружения поворачивается в предполагаемом направлении БПЛА, чтобы разместить оптический датчик, который определяет точное положение дрона. Данное решение обеспечивает полное полусферическое поле зрения, диапазон обнаружения более 500 м (для БПЛА взлетной массой от 1 до 6 кг и уровнем шума до

60 дБ на расстоянии 10 м) и погрешность трехмерного позиционирования менее 1,5 %.

Для акустического компонента мультимодальной системы разработчики используют шумоподавляющую модель глубокого обучения, которая эффективно извлекает акустические характеристики БПЛА из фоновых шумов. Микрофонная решетка имеет в своем составе 256 микрофонных элементов. Оптимизированная компоновка микрофонов позволяет увеличить расстояние обнаружения моделей БПЛА, описанных выше, до 1300 м.

Еще одна комплексная система — Anti Drone от Zen Technologies [19]. Она предназначена для обнаружения, классификации и отслеживания дронов (от малогабаритных, таких как DJI Mavic, до мульти роторных и самолетного типа, например, Bayraktar TB2) с помощью пассивного наблюдения, датчиков камер и нейтрализации путем воздействия на каналы связи БПЛА. Система имеет многосенсорную архитектуру, включающую: детектор на основе радиочастот, модуль видеондентификации и отслеживания, радар, модуль сбора данных и управления, радиочастотный глушиль.

Детектор на основе радиочастот обнаруживает БПЛА по каналу связи между устройством и наземным центром управления. На основе идентифицированного сигнала система оценивает направление БПЛА. Сервопривод, отвечающий за поворот камер, получает команду на позиционирование в определенном направлении. После позиционирования система захватывает



Рис. 3. Радары серии Blighter A400

изображение БПЛА на расстоянии до 3 км. Видеопотоки передаются в программный модуль, а алгоритмы обработки видео в программном обеспечении автоматически подтверждают присутствие БПЛА и поддерживают отслеживание.

Определение точного местоположения БПЛА осуществляется радаром, который предоставляет данные как по азимуту, так и по высоте. Далее информация передается в модуль сбора данных. Пользовательский интерфейс представляет полную картину ситуации угрозы: в нем отображается список обнаруженных сигналов и параметров, таких как частота и тип БПЛА и т.д. Далее при необходимости с помощью радиочастотного глушильника отключается связь между БПЛА и центром его управления. Также система способна физически уничтожить БПЛА путем стрельбы или захватить его сетью.

Израильской компанией Miltech Rafael Advanced Defense Systems была разработана противовоздушная система для борьбы с БПЛА — Drone Dome [20]. В системе Drone Dome размещаются различные датчики, включая радар RPS-42 компании RADA Electronic Industries, систему визуализации CONTROP Precision Technologies и детекторы радиосигналов. В январе 2023 года разработчиком была представлена модернизированная версия системы защиты Drone Dome, в которую интегрирован датчик RFeye от CRFS, способный обнаруживать БПЛА FPV-типа на расстоянии свыше 3,5 км по целому ряду векторов угроз и в широком (70 МГц–6 ГГц) рабочем диапазоне. Система устанавливается на земле, автомобиле или на корабле. При обнаружении БПЛА система может прервать связь БПЛА с центром или физически уничтожить его с помощью лазера.

Канадская компания Infiniti Electro-Optics разработала 2 вида комплексных систем, направленных на выявление и уничтожение БПЛА.

Первая система — Mobile Anti-Drone/UAV Elimination (MADE) [21] — это портативная система (выглядит как винтовка для легкой транспортировки, развертывания и нацеливания), использующая направленные высококонтенсивные радиочастотные волны для блокировки ручного и автоматизированного управления БПЛА с расстояния 1–2 км.

Вторая разработка — Automatic Drone Defense System (ADDS) — дальнобойная автома-

тическая система, которая обеспечивает обнаружение небольших БПЛА, таких как DJI Phantom, с расстояния до 5 км. ADDS обеспечивает панорамное покрытие на 360 градусов без слепых зон и возможность визуально отслеживать, распознавать и уничтожать БПЛА с расстояния до 2 км. Система состоит из радара, инфракрасной системы дневного/ночного наблюдения PTZ и широкополосного радиочастотного глушильника.

Выходы

Анализ современных методов обнаружения БПЛА демонстрирует многообразие подходов к защите от угроз, исходящих от БПЛА. Каждый из рассмотренных методов обладает своими преимуществами и недостатками, что делает необходимым создание комбинированных систем, интегрирующих разные способы обнаружения и, в некоторых случаях, противодействия стремительно развивающимся технологиям БПЛА.

Эффективность комплексной защиты повышается за счет объединения результатов радиолокационного слежения, визуальной верификации посредством камер и тепловой съемки, анализа радиоэфирных частот и активного акустического сканирования территории.

Дальнейшие направления совершенствования включают улучшение и оптимизацию интеллектуальных алгоритмов анализа многомерных данных, повышение разрешающей способности сенсоров и снижение стоимости компонентов. Совершенствование элементной базы позволит создавать новые компактные, мобильные устройства, пригодные для быстрого развертывания и долговременного функционирования в любых климатических зонах.

Список источников

1. Сильников М.В., Гук И.В. Приближенный метод решения смешанной игровой задачи с различными средствами нападения и защиты // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 9–10 (195–196). С. 3–8.

2. Сильников М.В., Лазоркин В.И., Гук И.В. О целесообразности возложения задач активной защиты авиационных комплексов на беспилотные летательные аппараты сопровождения тяже-

лого класса // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 3 (133). С. 41–45.

3. Пищин О.Н., Кабделова М.М. Исследование возможностей современных радиолокационных систем. [Электронный ресурс]. – URL: <https://moluch.ru/archive/396/87674> (дата обращения: 22.09.2025).

4. Сайт компании Karneev Systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.karneev.com/product/radiolokatsionnye-stantsii/spayder-antidron/> (дата обращения: 22.09.2025).

5. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.

6. Везарко Д.А., Чечельницкий А.С., Коптев В.А. Анализ радиолокационных систем обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. Вып. 3–2 (90). 158 с.

7. Ганин С.М., Карпенко А.В. Современные самоходные зенитные установки. СПб.: Бастион, 1999. 52 с.

8. Rousell J., Tafur Monroy I.: Detecting small drones using radio frequency signatures // IEEE Access. 2019, Jan. Vol. 7. Pp. 1844–1855.

9. Leahy M.P., Zhang Y., Chen Z. Multispectral imaging for detection and classification of micro-UAVs in urban environments // Optics Express. 2016, Nov. 24. No 22. Pp. 124–136.

10. Datasheet FLIR Boson® Thermal Imaging Core [Электронный ресурс]. URL: https://www.elimec.co.il/_Uploads/dbsAttachedFiles/Boson.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

11. Spynel-X [Электронный ресурс]. URL: https://hgh-infrared.com/wp-content/uploads/2021/03/Leaflet_Spynel-X_land_HGH_EN_ak1.pdf (дата обращения: 08.07.2025).

12. Tan X., Wang L.: Sound-based drone detection and localization. Vol. 19. No. 16. Aug. 2009. 16 p.

13. Станция по обнаружению дронов DJI Aeroscope [Электронный ресурс]. URL: <https://coptermarket.by/dji-shop/drones/promyshlennye-kvadrokoptery/stationary-aeroscope> (дата обращения: 08.07.2025).

14. Radio frequency DRONE Detection [Электронный ресурс]. URL: <https://www.dedrone.com/products/drone-detection/rf-sensors/overview> (дата обращения: 08.07.2025).

15. SM200C [Электронный ресурс]. URL: <https://signalhound.com/sigdownloads/datasheets/Signal-Hound-SM200C-Data-Sheet.pdf> (дата обращения: 22.09.2025).

16. Buhariwala H.K., Ramakrishnan V.S.: Design of low-cost RF-based UAV detector // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2019, Feb. Vol. 55. No 1. 12 p.

17. AUDS Anti-UAV Defence System [Электронный ресурс]. URL: <https://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system/> (дата обращения: 08.07.2025).

18. Drone Detection and Tracking System Based on Fused Acoustical and Optical Approaches [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/373162073_Drone_Detection_and_Tracking_System_Based_on_Fused_Acoustical_and_Optical_Approaches (дата обращения: 08.07.2025).

19. Anti Drone System (CUAS) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zentechologies.com/anti-drone-system-counter-drone-cuas.php> (дата обращения: 08.07.2025).

20. RAFAEL Advanced Defense Systems Ltd. Drone Dome [Электронный ресурс]. URL: <https://rafael-uk.com/wp-content/uploads/2022/10/Drone-Dome.pdf> (дата обращения: 23.09.2025).

21. CUAS/Anti-Drone Air Defense Solutions [Электронный ресурс]. URL: <https://www.infinitioptics.com/solutions/air-domain-defense/cuasair-defense> (дата обращения: 08.07.2025).

References

1. Sil'nikov M.V., Guk I.V. Method for solving a mixed game problem with different types of attack and defense // Questions of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 9–10 (195–196). Pp. 3–8.

2. Sil'nikov M.V., Lazorkin V.I., Guk I.V. On the expediency of assigning the tasks of active protection of aviation systems to heavy-class unmanned aerial vehicles // Proceedings of the russian academy of rocket and artillery sciences. 2024. No 3 (133). Pp. 41–45.

3. Pishchin O.N., Kabdelova M.M. Exploring the capabilities of modern radar systems. [Electronic resource]. URL: <https://moluch.ru/archive/396/87674> (date of reference: 22.09.2025).

4. Karneev Systems official website. [Electronic resource]. URL: <https://www.karneev.com/product/radiolokatsionnye-stantsii/spayder-antidron/> (date of reference: 22.09.2025).
5. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles: monografiya. SPb.: High-tech technologies, 2020. 204 p.
6. Vezarko D.A., Chechel'nitskii A.S., Kop'ev V.A. Analysis of radar systems for detecting small unmanned aerial vehicles // International journal of humanities and natural sciences. 2024. Vol. 3–2 (90). 158 p.
7. Ganin S.M., Karpenko A.V. Modern self-propelled anti-aircraft guns. SPb.: Bastion, 1999. 52 p.
8. Rousell J., Tafur Monroy I. Detecting small drones using radio frequency signatures // IEEE Access, Jan. 2019. Vol. 7. Pp. 1844–1855.
9. Leahy M.P., Zhang Y., Chen Z.: Multispectral imaging for detection and classification of micro-UAVs in urban environments // Optics Express, Nov. 2016. Vol. 24. No 22. Pp. 124–136.
10. Datasheet FLIR Boson® Thermal Imaging Core [Electronic resource]. URL: https://www.elimec.co.il/_Uploads/dbsAttachedFiles/Boson.pdf (date of reference: 08.07.2025).
11. Spynel-X [Electronic resource]. URL: https://hgh-infrared.com/wp-content/uploads/2021/03/Leaflet_Spynel-X_land_HGH_EN_ak1.pdf (date of reference: 08.07.2025).
12. Tan X., Wang L. Sound-based drone detection and localization. Aug. 2009. Vol.19. No 16. 16 p.
13. Stantsiya po obnaruzheniyu dronov DJI Aeroscope (DJI Aeroscope drone detection station) [Electronic resource]. URL: <https://coptermarket.by/dji-shop/drones/promyshlennye-kvadrokoptery/stationary-aeroscope> (date of reference: 08.07.2025).
14. Radio frequency DRONE Detection [Electronic resource]. URL: <https://www.dedrone.com/products/drone-detection/rf-sensors/overview> (date of reference: 08.07.2025).
15. SM200C [Electronic resource]. URL: <https://signalhound.com/sigdownloads/datasheets/Signal-Hound-SM200C-Data-Sheet.pdf> (date of reference: 22.09.2025).
16. Buhariwala H.K., Ramakrishnan V.S. Design of low-cost RF-based UAV detector // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Feb. 2019. Vol. 55. No 1. 12 p.
17. AUDS Anti-UAV Defence System [Electronic resource]. URL: <https://www.blighter.com/products/auds-anti-uav-defence-system/> (date of reference: 08.07.2025).
18. Drone Detection and Tracking System Based on Fused Acoustical and Optical Approaches [Electronic resource]. URL: https://www.researchgate.net/publication/373162073_Drone_Detection_and_Tracking_System_Based_on_Fused_Acoustical_and_Optical_Approaches (date of reference: 08.07.2025).
19. Anti-Drone System (CUAS) [Electronic resource]. URL: <https://www.zentechologies.com/anti-drone-system-counter-drone-cuas.php> (date of reference: 08.07.2025).
20. RAFAEL Advanced Defense Systems Ltd. Drone Dome [Electronic resource]. URL: <https://rafael-uk.com/wp-content/uploads/2022/10/Drone-Dome.pdf> (date of reference: 23.09.2025).
21. CUAS/Anti-Drone Air Defense Solutions [Electronic resource]. URL: <https://www.infinitioptics.com/solutions/air-domain-defense/cuasair-defense> (date of reference: 08.07.2025).