

Н.Д. Кабаков^{1*}, Р.Б. Шакиров^{1*} , Д.В. Гревцов¹ ,
Б.С. Касимов¹ , Д.А. Ксенофонов¹ 

¹Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: Raha_Shakirov@mail.ru

ИНТЕГРАЦИЯ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ И АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СОСТАВЕ МОБИЛЬНОГО АНТИДРОНОВОГО КОМПЛЕКСА

Аннотация

В статье авторами комплексно исследуется перспективное направление в области безопасности – интеграция мультисенсорных систем обнаружения и алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) в состав мобильных антидроновых комплексов. Целью настоящего исследования является анализ современных технологий мультисенсорного обнаружения беспилотных летательных аппаратов, а также разработка принципов построения мобильного антидронowego комплекса, интегрирующего системы обнаружения и алгоритмы искусственного интеллекта. Доказывается, что для эффективного противодействия в условиях динамичной обстановки необходим мобильный комплекс, обладающий высокой автономностью и скоростью реакции. Рассматриваются принципы построения мультисенсорной системы, сочетающей радиолокационные, оптико-электронные и радиочастотные средства, что позволяет преодолеть ограничения каждого отдельного сенсора за счет мультимодального слияния данных. Подробно анализируются роль алгоритмов искусственного интеллекта в обнаружении, классификации целей, слиянии данных и поддержке принятия решений в реальном времени. Предложена архитектура интеграции сенсоров и искусственного интеллекта в единую мобильную платформу, обеспечивающую адаптивность и устойчивость к сложным условиям эксплуатации. Работа обобщает ключевые технологические тренды и формирует целостное видение построения высокоэффективных мобильных средств противодействия беспилотным летательным аппаратам (БПЛА) нового поколения.

Ключевые слова: антидроновый комплекс, искусственный интеллект, мультисенсорная система, мобильная платформа, обнаружение БПЛА, слияние данных, радиоэлектронное подавление.

Н.Д. Кабаков¹, Р.Б. Шакиров¹, Д.В. Гревцов¹, Б.С. Касимов¹, Д.А. Ксенофонов¹

¹Радиоэлектроника және байланыс әскери-инженерлік институты Алматы қ., Қазақстан

ДРОНДАРҒА ҚАРСЫ ҰТҚЫР АНТИДРОН КЕШЕННІҢ ҚҰРАМЫНА КӨП СЕНСОРЛЫ АНЫҚТАУ ЖҮЙЕЛЕРІ МЕН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ АЛГОРИТМДЕРІН БІРІКТІРУ

Аңдатпа

Бұл мақалада авторлар қауіпсіздік саласындағы перспективалы бағыт – көпсенсорлық анықтау жүйелері мен жасанды интеллект (ЖИ) алгоритмдерін ұтқыр дронға қарсы кешендер құрамына біріктіруді кешенді түрде зерттейді. Осы зерттеудің мақсаты – ұшқышсыз ұшу аппараттарын (ҰША) көпсенсорлық анықтаудың заманауи технологияларына талдау жасау, сондай-ақ анықтау жүйелері мен жасанды интеллект алгоритмдерін біріктіретін ұтқыр дронға қарсы кешенді құру принциптерін әзірлеу. Дәлелденгендей, динамикалық жағдайда тиімді қарсы әрекет ету үшін жоғары автономиялылық пен реакция жылдамдығына ие ұтқыр кешен қажет. Радиолокациялық, оптоэлектрондық және радиожиілікті құралдарды біріктіретін көпсенсорлық жүйені құру принциптері қарастырылған, бұл мультимодальды деректерді біріктіру арқылы әрбір жеке сенсордың шектеулерін еңсеруге мүмкіндік береді. Жасанды интеллект алгоритмдерінің нысаналарды анықтау, жіктеу, деректерді біріктіру және нақты уақытта шешім қабылдауды қолдаудағы ролі егжей-тегжейлі талданады. Сенсорлар мен жасанды интеллектті бірыңғай ұтқыр платформаға біріктіру архитектурасы ұсынылған, бұл күрделі пайдалану жағдайларына бейімделу мен төзімділікті қамтамасыз етеді. Жұмыс

негізгі технологиялық трендтерді жинақтап, жаңа буын ұшқышсыз ұшу аппараттарына (ҰША) қарсы жоғары тиімді ұтқыр құралдарды құрудың тұтас көзқарасын қалыптастырады.

Түйін сөздер: антидрон кешені, жасанды интеллект, мультисенсорлық жүйе, мобильді платформа, ұшқышсыз ұшу аппараты, деректерді біріктіру, радиоэлектрондық қарсы әрекет.

N.D. Kabakov¹, R.B. Shakirov¹, D.V. Grevtsov¹, B.S. Kasimov¹, D.A. Xenofontov¹

¹Military engineering institute of radio electronics and communications, Almaty, Kazakhstan

INTEGRATION OF MULTISENSORY DETECTION SYSTEMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS IN A MOBILE ANTI-DRONE SYSTEM

Abstract

The authors of the article comprehensively investigate a promising direction in the field of security – the integration of multisensor detection systems and artificial intelligence (AI) algorithms into mobile anti-drone systems. The purpose of this study is to analyze modern technologies of multisensor detection of unmanned aerial vehicles (UAV), as well as to develop principles for building a mobile anti-drone system that integrates detection systems and artificial intelligence algorithms. It is argued that effective counteraction in a dynamic environment requires a mobile system with high autonomy and reaction speed. The principles of building a multisensor system combining radar, optoelectronic, and radio-frequency means are considered, which allows overcoming the limitations of each individual sensor through multimodal data fusion. The role of artificial intelligence algorithms in target detection, classification, data fusion, and real-time decision support is analyzed in detail. An architecture for integrating sensors and artificial intelligence into a single mobile platform is proposed, ensuring adaptability and resilience to challenging operating conditions. The paper summarizes key technological trends and forms a holistic vision for building highly effective next-generation mobile means of countering unmanned aerial vehicles (UAV).

Keywords: counter-drone system, artificial intelligence, multisensor system, mobile platform, UAV detection, data fusion, electronic countermeasures.

Введение

Опыт вооруженных конфликтов последнего десятилетия показал, что в современном бою доминантно лидирует применение беспилотных авиационных систем [1]. БПЛА, особенно коммерческие и самодельные FPV-дроны стоимостью в несколько сотен долларов, превратились из тактического инструмента в стратегическую угрозу, способную эффективно поражать дорогостоящую бронетехнику, артиллерию и живую силу [2]. Статистика свидетельствует о катастрофическом росте инцидентов: ежемесячный расход дронов на отдельных участках фронта исчисляется тысячами единиц, а угроза давно вышла за пределы поля боя, охватив критическую инфраструктуру, аэропорты и объекты в глубоком тылу [3, 4]. Традиционные системы ПВО зачастую неэффективны против малозаметных, низколетящих и массово применяемых целей [3-5], что создало острую потребность в специализированных средствах противодействия.

В этом контексте мобильные антидроновые комплексы на базе зенитных артиллерийских систем приобретают ключевое значение и актуальность. В отличие от стационарных систем, они способны оперативно перемещаться, прикрывая движущиеся колонны, развертываясь на новых рубежах обороны или защищая временные объекты [6, 7]. Их мобильность является прямым ответом на высокодинамичный характер дроновых атак. Однако эффективность такого комплекса в условиях ограниченного времени реакции, сложного рельефа, городской застройки и активного радиоэлектронного противодействия противника напрямую зависит от двух фундаментальных факторов: мультисенсорности и применения искусственного интеллекта.

Ни один отдельный тип сенсора (радар, камера, радиочастотный пеленгатор) не способен гарантировать надежное обнаружение и сопровождение всех типов БПЛА во всех возможных сценариях [8, с. 23]. Только интегрированное использование данных от разнородных датчиков позволяет компенсировать их взаимные недостатки и обеспечить всепогодность, круглосуточность и высокую достоверность. Значительный объем и высокая разнородность

информации, поступающей от мультисенсорных систем обнаружения, необходимость классификации целей (дрон/птица/снаряд) и принятия решений за секунды делают применение классических алгоритмов обработки сигналов недостаточным. Гипотеза заключается в том, что в системах противодействия БПЛА на первый план выходят алгоритмы ИИ, способные в реальном времени анализировать сложные данные, обучаться на опыте и принимать или рекомендовать оптимальные меры противодействия [9].

Таким образом, целью настоящего исследования является анализ современных технологий мультисенсорного обнаружения беспилотных летательных аппаратов, и разработка принципов построения мобильного антидроновой комплекса, интегрирующего системы обнаружения и алгоритмы искусственного интеллекта.

В последние годы в научной литературе активно рассматриваются вопросы применения искусственного интеллекта и мультисенсорных технологий для обнаружения беспилотных летательных аппаратов. Исследования показывают, что использование методов глубокого обучения и алгоритмов компьютерного зрения позволяет существенно повысить точность классификации малых БПЛА и снизить уровень ложных срабатываний систем обнаружения [10]. Одновременно значительное внимание уделяется развитию методов мультисенсорного слияния данных, позволяющих интегрировать информацию от радиолокационных, оптико-электронных и радиочастотных сенсоров в единую информационную модель обстановки [11]. Анализ существующих исследований свидетельствует о том, что наиболее перспективным направлением является создание интеллектуальных систем противодействия БПЛА, основанных на интеграции различных типов сенсоров и алгоритмов машинного обучения.

Значительное внимание вопросам противодействия беспилотным летательным аппаратам уделяется и на международном уровне. В ряде стран ведутся активные исследования и разработки в области интеллектуальных систем обнаружения и нейтрализации БПЛА. Так, в США и странах НАТО активно развиваются системы Counter-UAS, основанные на интеграции радиолокационных, оптико-электронных и радиочастотных сенсоров с алгоритмами машинного обучения для автоматической классификации целей и оценки уровня угрозы. В Израиле и ряде европейских стран активно разрабатываются мобильные антидроновые комплексы, способные обеспечивать защиту военных объектов и критической инфраструктуры в условиях массового применения малых БПЛА. Анализ международного опыта показывает, что наиболее эффективным направлением развития подобных систем является создание мультисенсорных архитектур, объединенных единым интеллектуальным центром обработки данных.

Методология исследования

В работе использованы методы системного анализа, сравнительного анализа сенсорных технологий обнаружения БПЛА, методы анализа научной литературы, а также методы структурного моделирования архитектуры антидроновых систем.

Научная новизна исследования заключается в систематизации архитектурных принципов интеграции мультисенсорных систем обнаружения и алгоритмов искусственного интеллекта в составе мобильного антидроновой комплекса, а также в обосновании требований к ключевым компонентам интеллектуальной системы противодействия беспилотным летательным аппаратам.

Результаты исследования

Результаты интеграции мультисенсорных систем обнаружения и алгоритмов искусственного интеллекта

Мультисенсорные системы обнаружения в антидроновых комплексах. Основой любого эффективного комплекса противодействия является подсистема обнаружения и сопровождения. Уникальные характеристики современных угроз – малые размеры (ЭПР от

0.01 м²), низкая и изменяющаяся высота полета, способность использовать «мертвые» зоны рельефа, применение помехозащищенных и автономных режимов – предъявляют исключительные требования к средствам обнаружения [4, 8]. Очевидно, что система, полагающаяся на один физический принцип, будет иметь критические уязвимости. Поэтому ядром современного комплекса является мультисенсорная система, объединяющая данные от различных типов датчиков.

Радиолокационные средства (РЛС) являются основным средством дальнего обнаружения и всепогодного сопровождения. Для борьбы с малыми БПЛА применяются РЛС X- или Ku-диапазонов, обладающие высокой разрешающей способностью. Они эффективно определяют дальность, азимут, скорость и высоту цели, работая в условиях радиоэлектронных помех и при отсутствии активного излучения со стороны дрона [8, 10]. Однако их эффективность снижается для низколетящих целей на фоне земли (проблема отражений от подстилающей поверхности), в условиях сложного городского рельефа, а также против дронов с малой ЭПР, изготовленных из композитных материалов. Кроме того, РЛС не может классифицировать цель, отличив дрон от птицы или другого предмета.

Оптико-электронные и инфракрасные (ОЭ/ИК) средства включают телевизионные камеры высокого разрешения и тепловизионные камеры. Они обеспечивают визуальное подтверждение цели, ее точное сопровождение и, что наиболее важно, классификацию на основе внешнего вида и теплового портрета [8, 10]. Алгоритмы компьютерного зрения, анализируя видеопоток, могут идентифицировать тип дрона (мультикоптер, самолетный), а в перспективе – его модель. ИК-камеры незаменимы в условиях слабой освещенности, тумана или дыма. Ключевым ограничением ОЭ/ИК систем является сильная зависимость от погодных условий (дождь, снег, туман резко снижают дальность), а также относительно небольшая дальность эффективного обнаружения по сравнению с РЛС [11, с. 18].

Радиочастотные (РЧ) пеленгаторы и анализаторы – это пассивные средства, которые обнаруживают дрон по его радиоизлучению – сигналам управления, телеметрии и передачи видео (чаще всего в диапазонах 443 МГц, 2.4 ГГц, 5.8 ГГц). Они позволяют не только засечь факт присутствия БПЛА, но и определить направление на него (пеленг), а в ряде случаев – выявить тип протокола связи и даже локализовать позицию оператора [4, 10]. Их главное преимущество – пассивность и скрытость работы. Недостатки очевидны: система бесполезна против дронов, работающих в режиме радиомолчания (по предварительно заложенному маршруту) или использующих защищенные, быстро перестраиваемые каналы связи.

Акустические сенсоры менее распространены, но могут использоваться как вспомогательное средство, особенно в городских условиях или для защиты небольших периметров. Они фиксируют характерный шум винтов дрона. Их главный минус – очень малая дальность действия и высокая чувствительность к фоновым шумам [12].

Преимущества совместного применения сенсоров носят синергетический характер. Комбинирование данных позволяет преодолеть ограничения каждого из них. Например, РЛС обеспечивает первичное обнаружение цели на дальней дистанции и выдает целеуказания ОЭ/ИК системе. Та, в свою очередь, осуществляет точное визуальное сопровождение и классификацию, подтверждая, что целью является БПЛА, а не птица. РЧ-пеленгатор может подтвердить факт радиообмена с целью, что служит дополнительным признаком ее враждебности. В условиях, когда РЛС «ослеплена» рельефом, основная нагрузка ложится на ОЭ/ИК и РЧ-средства. Данные от всех сенсоров сливаются в единую картину, что резко повышает вероятность правильного обнаружения и снижает количество ложных тревог. Предлагаем обратиться к сравнительному анализу сенсоров в составе мультисенсорной системы (таблица 1).

Таблица 1. Сравнительный анализ сенсоров в составе мультисенсорной системы

Тип сенсора	Принцип действия	Преимущества	Недостатки	Роль в системе
Радиолокационный (РЛС)	Активное излучение и прием отраженного сигнала	Всепогодность, большая дальность, измерение точных координат и скорости	Уязвимость к рельефу, проблемы обнаружения целей с очень малой ЭПР, неспособность к классификации	Основное средство дальнего обнаружения и всепогодного сопровождения
Оптико-электронный / ИК (ОЭ/ИК)	Прием естественного /теплового излучения цели	Всепогодность, большая дальность, измерение точных координат и скорости	Зависимость от погоды/видимости, ограниченная дальность	Классификация, точное сопровождение, визуальный контроль
Радиочастотный (РЧ)	Пассивный прием излучения дрона/оператора	Скрытность, определение типа протокола, пеленг на оператора	Неэффективен против автономных дронов (режим радиомолчания)	Подтверждение факта управления, классификация типа связи, пеленгование
Акустический	Пассивный прием звуковых волн	Пассивность, низкая стоимость	Очень малая дальность, чувствительность к помехам	Вспомогательное средство для коротких дистанций

Примечание: составлено на основании данных [5]

Таким образом, современный мобильный антидроновый комплекс немыслим без мультисенсорной системы, где каждый датчик выполняет свою роль, а их совместная работа, координируемая интеллектуальной системой управления, обеспечивает надежный и достоверный контроль воздушной обстановки.

Алгоритмы искусственного интеллекта в системе обработки данных. Собираемые мультисенсорной системой данные представляют собой огромные массивы разрозненной информации: радиолокационные отражения, видеопотоки в видимом и инфракрасном спектрах, радиочастотные спектрограммы. Задача их осмысленной и, главное, оперативной обработки для принятия решения о применении средств поражения ложится на алгоритмы искусственного интеллекта. Именно ИИ становится «мозгом» комплекса, трансформируя сырые данные в тактически значимые команды.

Первичная и ключевая задача ИИ – объединение информации от всех сенсоров в единую, непротиворечивую тактическую картину. Алгоритмы слияния данных (часто построенные на основе байесовских сетей, фильтров Калмана или нейронных сетей) решают проблему ассоциации измерений [8, 11]: определяют, относятся ли сигналы от радара, камеры и РЧ-пеленгатора к одному и тому же дрону или к разным объектам. На выходе этого процесса формируется единый «трек» для каждой обнаруженной цели с уточненными координатами, скоростью, вектором движения и оценкой достоверности.

После обнаружения и сопровождения критически важно определить тип объекта. ИИ, в частности алгоритмы компьютерного зрения на основе сверточных нейронных сетей (CNN, такие как YOLO, SSD), анализируют видеопоток с ОЭ/ИК камер [6, 13]. Обученные на огромных наборах данных (например, система «Титан» обучалась на 120 млн видеозаписей), они с высокой точностью отличают мультикоптер от птицы, самолетный БПЛА от легкомоторного самолета, а также могут идентифицировать конкретные модели дронов по их силуэту [14, 15]. Аналогично, алгоритмы анализа радиочастотного спектра могут классифицировать тип протокола связи дрона, что также является признаком его происхождения и возможностей.

Современные ИИ-системы не просто констатируют факт, но и пытаются предсказать развитие ситуации. Алгоритмы на основе обучения с подкреплением (RL) и анализа временных рядов могут прогнозировать траекторию полета дрона определять вероятную цель полета (например, движущуюся колонну или статичный объект) и оценивать уровень угрозы [3, 5]. Это позволяет перейти от реактивного к упреждающему противодействию. Например, система может рекомендовать нанести удар по дрону еще до того, как он войдет в зону гарантированного поражения охраняемого объекта.

На основе классификации цели, оценки ее траектории и уровня угрозы ИИ-алгоритмы формируют рекомендации для оператора или самостоятельно инициируют меры противодействия. Это может быть реализовано в виде нейро-символических систем, где нейронные сети обрабатывают сенсорные данные, а логические правила определяют последовательность действий [8, с. 24]. Система может автоматически выбрать оптимальное средство нейтрализации: сначала попытаться подавить дрон радиоэлектронными средствами (помехами или спуфингом GPS/ГЛОНАСС), и если это не сработает (например, для автономного дрона на оптоволокне), передать целеуказание на кинетические средства – лазер или автоматическую турель [15, 16]. Такой подход сокращает время цикла «обнаружение-поражение» с десятков секунд до единиц, что критически важно при отражении атак скоростных FPV-дронов.

Важнейшим качеством ИИ в боевых условиях является способность к адаптации. Противник постоянно меняет тактику, появляются новые типы дронов, применяются методы радиоэлектронного противодействия. Алгоритмы машинного обучения должны позволять «доучивать» систему на новых данных, полученных в ходе реальной эксплуатации, без полной замены программного обеспечения. Это обеспечивает долгосрочную эффективность комплекса в условиях быстро меняющейся угрозы. Таким образом, алгоритмы искусственного интеллекта выступают ключевым элементом интеллектуальной обработки информации, обеспечивая преобразование мультисенсорных данных в тактически значимую информацию и существенно повышая скорость принятия решений в системе противодействия беспилотным летательным аппаратам.

Интеграция сенсоров и алгоритмов ИИ в мобильный комплекс.

Создание эффективного мобильного антидронного комплекса представляет собой сложную инженерную задачу, требующую системной интеграции сенсорных средств обнаружения, вычислительных модулей обработки данных и средств нейтрализации целей в рамках единой архитектуры. Это проектирование целостной архитектуры, где физические сенсоры, вычислительные мощности, средства поражения и системы питания взаимодействуют как единый организм. Успех зависит от грамотной интеграции, обеспечивающей надежность, живучесть и адаптивность в полевых условиях. Типичная архитектура мобильного комплекса на основе мультисенсорности и ИИ является модульной и сетевцентричной [9, 17]:

- сенсорный уровень включает все датчики (РЛС, ОЭ/ИК-станции, РЧ-анализаторы), размещенные на выдвижных мачтах или поворотных платформах для обеспечения кругового обзора. Их ключевая задача – первичный сбор данных с минимальной предобработкой;

- вычислительный уровень является «мозговым центром». Состоит из высокопроизводительных серверов, часто с использованием графических ускорителей (GPU) для работы нейронных сетей. Здесь развернуто программное обеспечение, реализующее алгоритмы слияния данных, классификации, прогнозирования и управления;

- уровень средств противодействия включает средства радиоэлектронного подавления (джаммеры, спуферы), кинетические средства (управляемые турели, лазерные комплексы, средства запуска сетей или дронов-перехватчиков);

- уровень управления и отображения: автоматизированные рабочие места операторов с интерфейсами, отображающими тактическую обстановку, рекомендации ИИ и предоставляющими инструменты для ручного вмешательства;

– платформа и системы обеспечения – мобильное шасси (автомобильное, гусеничное), система электропитания, средства связи и навигации, системы термостабилизации.

Все уровни связаны высокоскоростной защищенной сетью (часто с резервированием), обеспечивающей обмен данными в реальном времени. Для отражения скоростных атак критически важна обработка данных с задержкой не более 1-2 секунд. Этот цикл организован следующим образом. Сенсоры непрерывно передают сырые данные в вычислительный блок, где алгоритмы в реальном времени ассоциируют их, формируя и поддерживая треки целей. Параллельно для каждого трека запускаются классификаторы (видеоаналитика, анализ РЧ-сигнатуры). На основе классификации и траектории модуль прогнозирования оценивает угрозу и выдает рекомендации. Комплекс либо автономно применяет средства поражения по заданным правилам, либо предлагает варианты действий оператору. Результаты воздействия фиксируются сенсорами и используются для обработки связи и адаптации алгоритмов [18]. Архитектура мобильного антидроновых комплекса с мультисенсорной системой и ИИ выглядит следующим образом (рисунок 1).

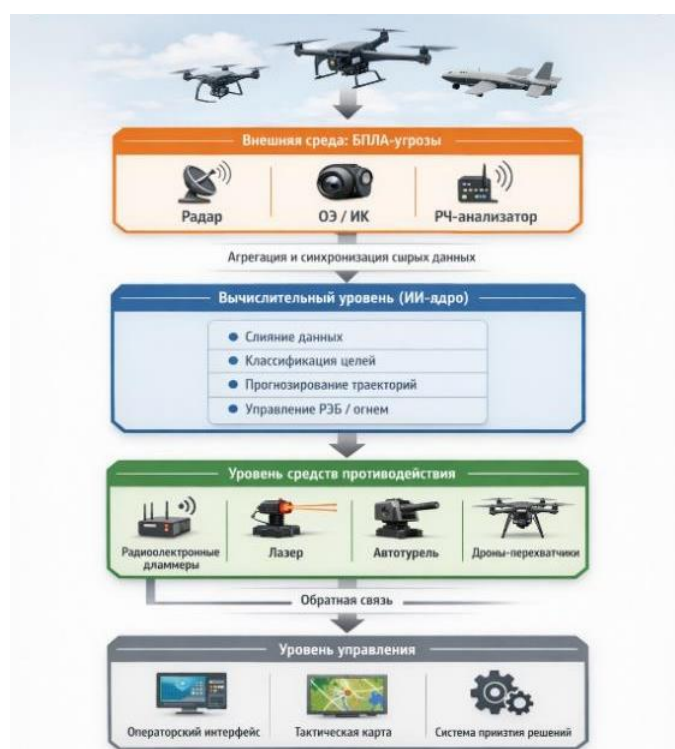


Рисунок 1. Архитектура мобильного антидроновых комплекса с мультисенсорной системой и ИИ

Операция мобильного комплекса в полевых условиях требует обеспечения ряда критических характеристик. Во-первых, это устойчивость к помехам, где алгоритмы ИИ должны эффективно фильтровать как естественные (пыль, дождь), так и искусственные радиозлектронные помехи, выделяя полезный сигнал от цели во всех рабочих диапазонах.

Во-вторых, комплекс должен обладать адаптивностью к эволюции угроз. Это подразумевает способность распознавать новые типы БПЛА и тактики, что достигается за счет алгоритмов с возможностью дообучения «на лету» и модульной архитектуры программного обеспечения, позволяющей оперативно интегрировать новые классификаторы.

В-третьих, максимальная эффективность достигается через сетевое взаимодействие. Работая в составе единого информационного контура, комплексы могут обмениваться данными о целях, получать целеуказание от внешних средств разведки или передавать его для поражения более мощными системами [11].

Наконец, вся интеллектуальная начинка должна быть размещена на живучей и высокоомобильной платформе. Конструкция обязана обеспечивать быстрое развертывание (за минуты), защиту от поражающих факторов и надежную работу в широком диапазоне климатических условий. В таблице 2 представлены требования к ключевым компонентам интегрированного мобильного комплекса.

Таблица 2. Требования к ключевым компонентам интегрированного мобильного комплекса

Компонент	Ключевые требования	Вклад в общую эффективность
Мультисенсорная система	Круговая зона обнаружения (радиус 5-10 км), время обновления данных < 1 с, автоматическое сопровождение множества целей	Формирование полной, достоверной и непрерывной картины воздушной обстановки
ИИ-вычислительное ядро	Производительность > 100 ТОПС, поддержка нейронных сетей, время обработки цикла «датчик-решение» < 2 с	Превращение данных в тактические решения, автоматизация, сокращение времени реакции
Средства противодействия	Многорезжимность (РЭБ + кинетика), быстрый доворот/наведение, возможность поражения роя	Реализация решений, принятых ИИ-ядром, гарантированная нейтрализация угрозы
Мобильная платформа	Проходимость, автономность > 8 часов, время развертывания < 5 мин, защищенность	Обеспечение возможности оперативного перемещения и развертывания в нужной точке
Система управления	Интуитивный интерфейс, возможность выбора степени автоматизации	Обеспечение контроля человека над системой в критических ситуациях

Примечание: составлено на основании данных [10]

Дискуссия

Интеграция сенсоров и ИИ в единую мобильную платформу создает качественно новый инструмент – не просто средство ПВО, а интеллектуальную тактическую единицу, способную самостоятельно оценивать угрозу и парировать ее с минимальным вмешательством человека.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования предложенных архитектурных принципов при разработке перспективных мобильных комплексов противодействия беспилотным летательным аппаратам, предназначенных для защиты критически важной инфраструктуры и военных объектов.

Заключение

Проведенный анализ позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Массовые и дешевые БПЛА, особенно FPV-дроны, стали ключевой тактической угрозой, стимулирующей спрос на специализированные средства противодействия.
2. Мобильные комплексы, благодаря своей гибкости, являются основным инструментом защиты маневренных подразделений и усиления стационарной обороны.
3. Надежное обнаружение и классификация БПЛА возможны только с помощью мультисенсорной системы, интегрирующей радиолокационные, оптико-электронные и радиочастотные средства.
4. Обработка данных и принятие решений в условиях дефицита времени требуют применения искусственного интеллекта для слияния информации, классификации целей и управления средствами поражения.
5. Эффективность определяется системной интеграцией всех компонентов в единый информационный контур с минимальными задержками.

6. Перспективы развития включают повышение автономности, развитие сетевого взаимодействия (рой), миниатюризацию и внедрение новых средств поражения (лазеры, микроволновое оружие).

Таким образом, интеграция мультисенсорности и ИИ является необходимым эволюционным шагом, создающим интеллектуальные тактические единицы для борьбы с современными угрозами. Дальнейшее развитие, подкрепленное опытом и господдержкой, сделает эффективное противодроновое прикрытие обязательным элементом обороны.

Благодарность

Исследование проведено в рамках грантового финансирования №АР 261038/0224 «Разработка боевого модуля для повышения эффективности зенитной артиллерии малого калибра на основе искусственного интеллекта» (Источник финансирования: Комитет науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Вклад авторов. Существенный вклад в концепцию работы внес Кабаков Н.Д, на основе его рекомендаций Ксенофонтовым Д.А и Шакировым Р.Б произведены сбор и анализ исходных данных, что дало в свою очередь возможность Касимову Б.С. критически подойти к их содержанию. Огромный вклад также внес Гревцов Д.В., интерпретировав результаты работы и предложив окончательный вариант статьи для публикации. Конфликт интересов отсутствует. Все авторы согласны нести ответственность за все аспекты работы, надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с достоверностью данных или целостностью всех частей статьи.

Список использованных источников

[1] Степанова Е. Вооруженные конфликты начала XXI века: типология и направления трансформации. *Мировая экономика и международные отношения*, 2020, т.64, №6, с. 24-39. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-6-24-39> (дата обращения 09.02.2026)

[2] Дудкин А.А., Ганченко В.В., Инютин А.В., Марушко Е.Е. Идентификация и классификация объектов на изображениях, полученных с помощью съёмочных средств БПЛА и орбитального базирования // *Системный анализ и прикладная информатика*. – Минск. – 2022. - №4. – С.30-37.

[3] Актуальные методы противодействия БПЛА в 2026 году: практическое руководство [Электронный ресурс] // *Detector System*. – 2026. – Режим доступа: <https://detsys.ru/article/aktualnye-metody-protivodeystviya-bpla-v-2026> (дата обращения: 09.02.2026.)

[4] Минпромторг включил антидроновое изделие в реестр производителей: новые возможности для отрасли 2026 [Электронный ресурс] // *Реестр Гарант*. – 2025. – Режим доступа: <https://vnesenie-v-reestr.ru/news/minpromtorg-vklyuchil-antidronovoe-izdelie-v-reestr-proizvoditeley-novye-vozmozhnosti-dlya-otrasli-2025> (дата обращения: 09.02.2026.)

[5] Michel A. Counter-UAS Systems: Technologies, Capabilities and Challenges // *Journal of Defense Studies*. – 2024. – Vol. 18. – No. 2. – P. 45–62.

[6] Гибадуллин, Д. Цифры, тренды, вызовы и перспективы международного и российского рынков решений противодействия БПЛА [Электронный ресурс] / Д. Гибадуллин // *Директор по безопасности*. – 2025. – № 10. – Режим доступа: https://www.sec-company.ru/articles/economics/instrumenty_bezopasnosti_tsifry_trendy_vyzovy_i_perspektivy_mezhdunarodnogo_i_rossiyskogo_rynkov_reshe/ (дата обращения: 09.02.2026.)

[7] Все, что вы должны знать о мобильных антидронах [Электронный ресурс] // *Панорама*. – 2026. – Режим доступа: <https://www.panram.ru/partners/news/vse-chto-vy-dolzhen-znat-o-mobilnykh-antidronakh/> (дата обращения: 09.02.2026.)

[8] Исмаилов, Д. В. Антидроновый комплекс для обнаружения, подавления и поражения целей / Д. В. Исмаилов, Д. А. Ксенофонтов, Н. Б. Зикирьяев, А. А. Кабдуллин // *ААА ЖАРШЫСЫ*. – 2026. – № 3 (38). – С. 22–31.

- [9] Рудковский, А. С перехватчиками на 350 км/ч: антидроновый комплекс «Квантум» представили на выставке NAIS 2026 [Электронный ресурс] / А. С. Рудковский. – 2026. – Режим доступа: <https://www1.ru/news/2026/02/05/s-perexvatcikami-na-350-kmc-antidronovyi-kompleks-kvantum-predstavili-na-vystavke-nais-2026.html> (дата обращения: 09.02.2026.)
- [10] Coluccia, A. Deep learning for drone detection and tracking: A survey / A. Coluccia, A. Fascista, L. Schumann // *Sensors*. – 2023. – Vol. 23. – No. 4. – pp. 2152–2174.
- [11] Khaleghi, B. Multisensor data fusion: A review of the state of the art / B. Khaleghi, A. Khamis, F. Karray // *Information Fusion*. – 2023. – Vol. 95. – pp. 20–40.
- [12] Овченко, Н. Система «Антидрон»: успеть за 83 секунды [Электронный ресурс] / Н. Овченко. – 2020. – Режим доступа: <https://www.secuteck.ru/articles/sistema-antidron-uspet-za-83-sekundy> (дата обращения: 09.02.2026.)
- [13] Гайнутдинов, Т. Ю. Алгоритмы определения пространственного положения беспилотного летального аппарата относительно посадочной платформы с использованием компьютерного зрения / Т. Ю. Гайнутдинова, С. В. Новикова, В. Г. Гайнутдинова, М. В. Трусфус, В. М. Литвин // *Вестник Самарского университета*. – 2023. – № 4. – С. 37–51.
- [14] Что такое акустические сенсоры и как они работают? [Электронный ресурс] // РОССТИП. – 2025. – Режим доступа: <https://rosstip.ru/news/5869-cto-takoe-akusticheskie-sensory-i-kak-oni-rabotayut> (дата обращения: 09.02.2026.)
- [15] Представлен антидроновый комплекс «Титан» с ИИ для защиты от БПЛА [Электронный режим] // *Tek.fm*. – 2026. – Режим доступа: <https://news.tek.fm/news/283998> (дата обращения: 09.02.2026.)
- [16] «Калашников» создал «истребителя БПЛА» с ИИ и «модной» электроникой [Электронный ресурс] // *RIGOL*. – 2025. – Режим доступа: <https://russianelectronics.ru/2025-10-29-kalashnikov/> (дата обращения: 09.02.2026.)
- [17] Иринин, Д. В России представили антидроновую систему с пулеметом и «Креchetом» [Электронный ресурс] / Д. Иринин. – 2025. – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2025/10/28/v-rossii-predstavili-antidronovuyu-sistemu-s-pulemetom-i-krechetom/> (дата обращения: 09.02.2026.)
- [18] Шилов, О. Дроны, искусственный интеллект и нейросети [Электронный ресурс] / О. Шилов. – 2022. – Режим доступа: <https://www.secuteck.ru/articles/drony-iskusstvennyj-intellekt-i-nejroseti> (дата обращения: 09.02.2026.)

References

- [1] Stepanova, E. (2020). Vooruzhennyye konflikty nachala XXI veka: tipologiya i napravleniya transformatsii [Armed conflicts of the early 21st century: typology and directions of transformation]. *Mirovaya jekonomika i mezhdunarodnye otnosheniya*, vol. 64, no. 6, 24-39. [Electronic resource] – Access mode: <https://doi.org/10.20542/0131-2227-2020-64-6-24-39> (accessed: 09.02.2026.). (In Russian)
- [2] Dudkin, A.A., Gantenko, V.V., Inyutin, A.V., Marushko, E.E. (2022) Identifikatsiya i klassifikatsiya ob'ektov na izobrazheniyah, poluchennykh s pomoshh'yu s#mochnykh sredstv BPLA i orbital'nogo bazirovaniya [Identification and Classification of Objects in Images Obtained from UAV and Orbital-Based Observation Systems]. *System Analysis and Applied Informatics*. Minsk. 4. 30-37. (In Russian)
- [3] Aktual'nye metody protivodejstviya BPLA v 2026 godu: prakticheskoe rukovodstvo [Current Methods for Countering UAVs in 2026] Practical Guide [Electronic resource]. *Detector System*. Access mode: <https://detsys.ru/article/aktualnye-metody-protivodeystviya-bpla-v-2026> (accessed: 09.02.2026.). (In Russian)
- [4] Minpromtorg vkluchil antidronovoe izdelie v reestr proizvoditelej: novye vozmozhnosti dlja otrasli 2026 [The Ministry of Industry and Trade Included Anti-Drone Product in the Register of Manufacturers: New Opportunities for the Industry in 2026]. [Electronic resource]. *Register Garant*. Access mode: <https://vnesenie-v-reestr.ru/news/minpromtorg-vklyuchil-antidronovoe-izdelie-v-reestr-proizvoditeley-novye-vozmozhnosti-dlya-otrasli-2025> (accessed: 09.02.2026.). (In Russian)
- [5] Michel A. (2024) Counter-UAS Systems: Technologies, Capabilities and Challenges // *Journal of Defense Studies*. Vol. 18. No. 2. 45–62.
- [6] Gibadullin, D. (2025) Cifry, trendy, vyzovy i perspektivy mezhdunarodnogo i rossiyskogo rynkov resheniy protivodejstviya BPLA [Figures, trends, challenges, and prospects for the international and Russian markets for counter-UAV solutions]. [Elektronnyy resurs]. D. Gibadullin. *Direktor po bezopasnosti*. № 10. *Sposob dostupa:* <https://www.sec-company.ru/articles/economics/instrumenty>

[bezopasnosti tsifry trendy vyzovy i perspektivy mezhdunarodnogo i rossiyskogo rynkov resh/](#) – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[7] Vse', chto vy dolzhny znat' o mobil'nykh antidronakh (2026) [Everything you need to know about mobile anti-drone devices]. [Elektronnyy resurs]. Panorama.2026. Rezhim dostupa: <https://www.panram.ru/partners/news/vse-chto-vy-dolzhny-znat-o-mobilnykh-antidronakh/> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[8] Ismailov, D. V. (2026) Antidronovyy kompleks dlya obnaruzheniya, podavleniya i porazheniya tseley [Anti-drone complex for detecting, suppressing and destroying targets]. D. V. Ismailov, D. A. Ksenofontov, N. B. Zikiryayev, A. A. Kabdullin // AAA ZHARSHYSY. - № 3 (38). 22–31. (In Russian)

[9] Rudkovskiy, A. S (2026) perekhvatchikami na 350 km/ch: antidronovyy kompleks «Kvantum», predstavlenyy na vystavke NAIS 2026. [With 350 km/h interceptors: the Quantum anti-drone system was unveiled at the NAIS 2026 exhibition.]. [Elektronnyy resurs]. A. S. Rudkovskiy. Rezhim dostupa: <https://www1.ru/news/2026/02/05/s-perexvatcikami-na-350-kmc-antidronovyi-kompleks-quantum-predstavili-na-vystavke-nais-2026.html> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[10] Coluccia, A. (2023) Deep learning for drone detection and tracking: A survey. A. Coluccia, A. Fascista, L. Schumann. Sensors. Vol. 23. No. 4. 2152–2174.

[11] Khaleghi, B. (2023) Multisensor data fusion: A review of the state of the art / B. Khaleghi, A. Khamis, F. Karray. Information Fusion. Vol. 95. 20–40.

[12] Ovchenkov, N. (2020) Sistema «Antidron»: uspekh za 83 sekundy [Anti-Drone System: 83 Seconds to Get There]. [Elektronnyy resurs]. N. Ovchenkov. Rezhim dostupa: <https://www.secuteck.ru/articles/sistema-antidron-uspet-za-83-sekundy> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[13] Gaynutdinov, T. YU. (2023) Algoritm opredeleniya prostranstvennogo polozheniya bespilotnogo letatel'nogo apparata otnositel'no posadochnoy platformy s ispol'zovaniyem komp'yuternogo zreniya. [Algorithms for determining the spatial position of an unmanned aerial vehicle relative to a landing platform using computer vision]. T. YU. Gaynutdinova, S. V. Novikova, V. G. Gaynutdinova, M. V. Trusfus, V. M. Litvin // Vestnik Samarskogo universiteta. № 4. 37–51. (In Russian)

[14] Chto takoye akusticheskiye sensory i kak oni rabotayut? (2025). [What are acoustic sensors and how do they work?]. [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <https://rosstip.ru/news/5869-chto-takoe-akusticheskie-sensory-i-kak-oni-rabotayut> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[15] Predstavlen antidronovyy kompleks «Titan» s II dlya zashchity ot BPLA (2026). [The Titan anti-drone system with AI for protection against UAVs has been unveiled.]. [Elektronnyy rezhim]. Tek.fm. Rezhim dostupa: <https://news.tek.fm/news/283998> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[16] «Kalashnikov» sozdal «istrebitelya BPLA» s II i «modnoy» elektronikoy (2025). [Kalashnikov has created a "drone fighter" with AI and "fashionable" electronics.]. [Elektronnyy resurs]. RIGOL. Rezhim dostupa: <https://russianelectronics.ru/2025-10-29-kalashnikov/> (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[17] Irinin D. V (2025) Rossii predstavili antidronovuyu sistemu s pulemetom i «Krechetom». [Russia unveiled an anti-drone system with a machine gun and the Krechet missile system.]. [Elektronnyy resurs]. D. Irinin. Rezhim dostupa: <https://lenta.ru/news/2025/10/28/v-rossii-predstavili-antidronovuyu-sistemu-s-pulemetom-i-krechetom/> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)

[18] Shilov, O. (2022) Drony, iskusstvennyy intellekt i neyronnyye seti. [Drones, artificial intelligence, and neural networks]. [Elektronnyy resurs] O. Shilov. Rezhim dostupa: <https://www.secuteck.ru/articles/drony-iskusstvennyj-intellekt-i-nejroseti> – (accessed: 09.02.2026.) (In Russian)