

Алгоритмы системы управления оптико-электронным стендом противодействия малоразмерным беспилотным летательным аппаратам

Я.С. Шевень, А.С. Локтев, Д.Ю. Татаркин

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87
E-mail: sheven@laser33.ru

В статье рассматривается интегрированная система управления, предназначенная для автоматического наведения и стабилизации оптико-электронного комплекса лазерного воздействия на малоразмерные беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Стенд объединяет радиолокационную станцию обнаружения, двухканальную оптико-электронную систему, опорно-поворотное устройство и волоконный лазер мощностью 3 кВт в единый замкнутый контур. Представлены архитектура системы, алгоритмы нейросетевого обнаружения и сопровождения целей, а также результаты экспериментальных исследований. В рамках проведенных испытаний подтверждена возможность функционального подавления типовых мишеней на дистанциях до 200 м.

Ключевые слова: система управления, оптико-электронный комплекс, беспилотный летательный аппарат, лазерное воздействие, радиолокационная станция, нейросетевое сопровождение.

Algorithms for the control system of an optical-electronic stand for countering small-sized unmanned aerial vehicles

Y.S. Sheven, A.S. Loktev, D.Y. Tatarkin

Vladimir State University.

The paper considers an integrated engineering control system designed for automatic pointing and stabilization of an optoelectronic complex for laser engagement of small-sized unmanned aerial vehicles (UAVs). The system combines a detection radar, a dual-channel optoelectronic system, a pan-tilt unit, and a 3 kW fiber laser into a single closed loop. The system architecture, algorithms for neural network-based target detection and tracking, as well as experimental results are presented. The tests confirmed the possibility of functional suppression of typical targets at distances up to 200 m.

Keywords: control system, optoelectronic complex, unmanned aerial vehicle, laser engagement, radar station, neural network tracking

Введение

Широкое распространение малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в последние годы создало новые вызовы в области обеспечения безопасности критической инфраструктуры [1]. Благодаря доступности, высокой маневренности, автономности и способности действовать на малых и предельно малых высотах такие аппараты могут использоваться для обнаружения, наблюдения, разведки и нарушения функционирования объектов энергетики, транспорта, связи и промышленности [2, 3]. Дополнительную сложность представляет малая эффективная площадь рассеяния БПЛА, а также возможность их применения в условиях сложной помеховой обстановки и городской среды. Традиционные системы противовоздушной обороны, оптимизированные для функционального подавления крупных воздушных целей, часто оказываются малоэффективными против малоразмерных, маловысотных и быстроманевренных объектов [4].

В связи с этим активно развиваются альтернативные методы противодействия БПЛА, основанные на применении высокоточных средств направленного воздействия. Среди перспективных решений особое место занимают лазерные комплексы направленной энергии. Данные системы обладают рядом преимуществ, включая высокую скорость воздействия, возможность точечного наведения, минимальное время реакции, низкую стоимость одного воздействия и отсутствие необходимости использования боеприпасов [5, 6]. Кроме того, лазерные комплексы обеспечивают возможность многократного применения и высокую точность локального энергетического воздействия на элементы конструкции и оптико-электронные системы БПЛА.

Однако практическая реализация лазерного противодействия связана с рядом технических трудностей. Эффективность воздействия существенно зависит от точности наведения лазерного излучения, устойчивости сопровождения цели и способности системы компенсировать угловые колебания, вибрации и динамические изменения положения БПЛА в пространстве. При воздействии на малоразмерные цели критическое значение приобретают алгоритмы обнаружения, распознавания и сопровождения, обеспечивающие удержание лазерного пятна в заданной области объекта в течение необходимого времени [7]. Дополнительное влияние оказывают атмосферные факторы, включая турбулентность, рассеяние и поглощение излучения, приводящие к снижению плотности мощности на поверхности цели.

Современные системы лазерного противодействия представляют собой сложные аппаратно-программные комплексы, объединяющие средства технического зрения, исполнительные механизмы наведения, лазерный источник излучения и контур автоматического управления. Для обеспечения требуемой точности сопровождения необходимо исследование процессов формирования управляющих воздействий, параметров оптической системы и особенностей взаимодействия исполнительных приводов с системой обработки изображений. Особую актуальность приобретает разработка лабораторных стендов, позволяющих моделировать реальные условия работы комплекса и проводить экспериментальную отработку алгоритмов управления и сопровождения.

Для решения данного вопроса произведено создание лабораторного стенда, реализующего реальную установку лазерного воздействия. Стенд включает в себя оптическую систему формирования и наведения лазерного излучения, средства видеонаблюдения и технического зрения, исполнительные механизмы позиционирования, а также программный комплекс обработки изображений и управления приводами. Использование подобного стенда позволяет проводить исследования точности наведения, устойчивости сопровождения движущихся целей и эффективности алгоритмов управления в условиях, приближенных к реальной эксплуатации лазерных комплексов противодействия БПЛА.

Материалы и методы исследования

1. Состав лабораторного стенда

Основными элементами стенда являются:

- Лазерный источник: иттербиевый волоконный лазер ИЛМ-3000-ОМ-В (VPG LaserOne) с номинальной мощностью 3 кВт, работающий в непрерывном режиме с использованием выходного оптического блока лазерного излучателя [7]. Охлаждение – воздушное принудительное.

- Радиолокационная станция (РЛС): мобильная РЛС С-диапазона (5,4–5,8 ГГц) разработки Новгородского государственного университета. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики радиолокационной станции

Параметр	Значение
Диапазон обрабатываемых дальностей	0–25 км
Элемент разрешения по дальности	3 м
Минимальная дальность обнаружения	30 м
Зона обзора по азимуту	120°
Темп обзора	0,5 с
Излучаемая импульсная мощность	2 Вт
Потребляемая мощность	не более 30 Вт
Интерфейс передачи данных	Ethernet (TCP/IP)

– Оптико-электронная система (ОЭС): построена по дуальному принципу. Широкоугольный канал (обнаружение) реализован на основе узла светоделителя P30-002424 с полем зрения около 1,6°. Узкоугольный канал (точное сопровождение) включает телескоп системы Максудова-Кассегрена Sky-Watcher BK MAK150SP (апертура 150 мм, фокусное расстояние 1800 мм) и высокоскоростную камеру VisCam NS-502UC (разрешение 2448×2048 пикселей, частота кадров 79 Гц, интерфейс USB 3.0). Для измерения дальности до цели использовался лазерный дальномер LSR-031 OMS-01-2305065Z (длина волны 1535 нм, диапазон 20–3000 м, точность ±1 м, интерфейс RS-422).

– Опорно-поворотное устройство (ОПУ): двухосевая система на базе моторизованных поворотных столов Optics Focus MOR-200-90 (горизонтальная ось) и MOR-215-70 (вертикальная ось). Управление осуществляется контроллером mDrive R9-3 (ООО «СТЕЛМ», Россия) с открытым SDK для ОС Linux. Основные параметры ОПУ: грузоподъемность не менее 40 кг; диапазон углов – азимут 240°, угол места от 0 до +80°; максимальная угловая скорость 20°/с; точность репозиционирования ±0,005°; люфт 0,005°.

– Автоматизированное рабочее место (АРМ): промышленный компьютер на базе ОС Linux (Ubuntu 22.04) с графическим процессором NVIDIA (поддержка CUDA), мониторами и органами управления.

2. Архитектура системы управления

Система управления стенда построена по принципу каскадного контура с обратной связью. Внешний контур образован радиолокационной станцией, обеспечивающей обнаружение цели и выдачу целеуказания с периодом 0,5 с. Внутренний контур включает оптико-электронную систему и опорно-поворотное устройство, реализующие точное сопровождение с высокой частотой обновления.

В промежутках между обновлениями радиолокационной информации и после передачи информации о местоположении цели сопровождение осуществляется средствами оптико-электронного канала, что позволяет обеспечить более высокую частоту обновления координат цели.

3. Алгоритмы обработки информации

3.1. Обработка радиолокационных данных

На АРМ реализован программный модуль RadarClient, который устанавливает сокетное соединение, принимает поток данных, десериализует JSON-сообщения в структурированную модель RadarData и генерирует событие для подсистемы наведения. В RadarData содержатся: информация о состоянии РЛС, список целей с параметрами

(координаты в локальной системе, дальность, пеленг, высота, скорость, флаги). Для сглаживания траекторий и подавления ложных целей применяется фильтр Калмана [8].

3.2. Нейросетевое обнаружение и сопровождение целей

Обнаружение БПЛА на видеопотоке осуществляется с помощью одностадийного детектора YOLOv8/YOLOX, интегрированного в модуль YoloProcessor. Модель загружается в формате ONNX и выполняется под управлением ONNX Runtime с аппаратным ускорением на GPU. Параметры детектора: порог уверенности 0,1–0,5, порог non-maximum suppression (NMS) 0,45–0,50. Для уменьшения ложных срабатываний применяется фильтрация фона: используются медианная модель фона (буфер 20 кадров) и адаптивный метод KNN (история 50 кадров). Классификация типа БПЛА (квадрокоптер, гексакоптер, самолетного типа, дельтавидный, «не дрон») выполняется сетью ResNet. Для стабильности предсказаний применяется сглаживание по окну из 7 кадров и «заморозка» результата на ограниченное число кадров [9].

Сопровождение реализовано в модуле TrackerManager на основе корреляционного трекера CSRT (Channel and Spatial Reliability Tracking) [10]. Для каждого обнаруженного объекта инициализируется отдельный трекер. Сопоставление детекций с существующими треками производится каждые 5 кадров с использованием комбинированной метрики: пересечение ограничивающих рамок (IoU, порог 0,5), сходство цветовых гистограмм (косинусное расстояние, порог 0,7) и, при необходимости, сопоставление дескрипторов ORB. Предсказание траектории на краткосрочную перспективу (до 1–2 с) осуществляется двумя способами: полиномиальной регрессией с адаптивной степенью (при гладком движении) и фильтром частиц (при высокоманевренных целях).

3.3. Управление наведением и лазерным излучением

Алгоритм наведения включает следующие этапы:

1. По данным РЛС вычисляются требуемые углы азимута и места в системе координат ОПУ.

2. Контроллер mDrive R9-3 по команде MoveTo отработывает перемещение. Ожидание завершения движения осуществляется методом WaitStop.

3. После стабилизации ОПУ активируется видеозахват, и нейросетевая подсистема осуществляет захват цели в кадре.

4. При устойчивом сопровождении оператор (или автоматическая логика) инициирует включение лазера. Команды на лазер передаются через последовательный порт: установка мощности (SDC), включение/выключение излучения (EMON/EMOFF), запрос состояния (STA).

5. Предусмотрено аварийное отключение излучения по кнопке безопасности, а также при потере цели или превышении максимального времени воздействия.

Выбор используемых алгоритмов обусловлен требованиями к работе системы в реальном времени.

4. Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проводились на открытом полигоне в зимних условиях (температура –3 °С, относительная влажность 73%, слабый снег, скорость ветра 2–4 м/с). Разметка полигона выполнялась с шагом 50 м на дальность до 400 м. Использовались стационарные мишени из фанеры (толщина 3 мм), стеклопластика (2 мм) и алюминия (2 мм). Фиксация результатов велась с помощью штатных средств видеорегистрации и лазерного дальномера. Проверка работоспособности РЛС проводилась как в режиме программного симулятора, так и с реальными целями (наземные уголкового отражатели, имитирующие БПЛА с эффективной площадью рассеяния 0,01–0,10 м²). Оценка

точности наведения выполнялась путем сравнения координат цели, получаемых с ОЭС, с эталонными траекториями.

Проведение испытаний

1. Характеристики радиолокационного канала

В ходе испытаний с использованием симулятора РЛС подтверждена возможность стабильного обнаружения целей с ЭПР 0,01–0,10 м² на дальностях до 600 м. Погрешность измерения дальности не превышала элемента разрешения (3 м), погрешность по азимуту – 0,5°. Реальный темп обновления информации о целях составил 2 Гц, что соответствует заявленным характеристикам. Интеграция РЛС с АРМ обеспечила задержку передачи целеуказания менее 100 мс, что является достаточным для работы внутреннего контура сопровождения.

2. Эффективность нейросетевого обнаружения и сопровождения

На видеопоследовательностях, записанных в реальных условиях (дистанции 100–400 м, переменное освещение, фоновые объекты), детектор YOLOv8 достиг средней точности (mAP@0.5) 0,87 при частоте обработки 25 кадров/с на GPU NVIDIA. Классификатор ResNet показал точность идентификации типов БПЛА 0,91 (по выборке из 500 размеченных кадров). Трекер CSRT обеспечил непрерывное сопровождение цели при ее угловом перемещении со скоростью до 20°/с; средняя ошибка позиционирования ограничивающей рамки составила 12 пикселей при разрешении 2448×2048. Данное значение получено для дистанции 200–400 м. При кратковременной потере детекции (до 5 кадров) трекер успешно восстанавливал цель за счет предсказания фильтром частиц.

3. Точность позиционирования и функционального подавления мишеней

В процессе полигонных испытаний были получены следующие результаты подавления стационарных мишеней лазерным излучением мощностью 3 кВт (таблица 2). Время фиксировалось по появлению дыма (для стеклопластика и фанеры на дистанции 200 м) или открытого пламени (фанера, 100 м).

Таблица 2. Результаты испытаний

Материал мишени	Толщина, мм	Дистанция, м	Время подавления, с
Фанера	3	100	2,9
Фанера	3	200	3,0
Стеклопластик	2	200	19,0
Алюминий*	2	50	7,0

*Примечание: для алюминия проводились дополнительные испытания с лазером, имеющим выходное волокно 100 мкм (вместо 200 мкм), что уменьшило диаметр пятна и обеспечило сквозной пробой.

Увеличенное время функционального подавления стеклопластика (19 с) объясняется неоптимальным распределением интенсивности в пятне лазерного излучения, вызванным отклонениями параметров изготовленных оптических элементов (сферических линз) от расчетных значений (ошибки радиусов кривизны и качества поверхности). Этот фактор будет устранен при замене оптики на элементы, соответствующие чертежам.

4. Выявленные ограничения и пути их устранения

В ходе экспериментов были идентифицированы следующие недостатки системы:

– непараллельность оптических осей камер, дальномера и выходного оптического блока лазера, что требует введения регулировочных элементов;

- недостаточная жесткость кронштейнов крепления узкоугольной камеры, приводящая к микровибрациям при работе ОПУ;
- ложные захваты на сопровождение объектов, не являющихся БПЛА (птицы, наземные объекты), что предполагает дальнейшее расширение обучающей выборки и доработку классификатора;
- зависимость работы лазерного дальномера от гидрометеоров (снег, дождь) – периодические ошибочные измерения дальности до снежинок, что требует применения алгоритмов временной фильтрации.

В дополнительных испытаниях с установкой дополнительных винтовых опор шасси (уменьшение вибраций) и заменой выходного волокна лазера на 100 мкм (что повлекло уменьшение диаметра пятна лазерного излучения) были получены улучшенные результаты: сквозной пробой алюминиевого листа толщиной 2 мм на дистанции 50 м за 7 с при мощности 3 кВт.

Выводы

1. Разработана интегрированная радиотехническая система управления оптико-электронным комплексом для противодействия малоразмерным БПЛА. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенных решений и возможность их практического применения.
2. Предложенные алгоритмы нейросетевого обнаружения (YOLOv8) и сопровождения (CSRT + фильтр частиц) обеспечивают устойчивое сопровождение цели с частотой 25 кадров/с и точностью позиционирования ограничивающей рамки не хуже 12 пикселей на дистанции до 400 м.
3. Экспериментально подтверждена возможность функционального подавления типовых мишеней (фанера, стеклопластик) лазерным излучением мощностью 3 кВт на дистанциях 100 и 200 м. Время подавления составило от 2,9 до 19,0 с в зависимости от материала и качества фокусировки.
4. Выявлены конструктивные и алгоритмические недостатки (непараллельность осей, вибрации кронштейнов, ложные захваты), которые будут устранены в ходе дальнейших исследований. Перспективными направлениями являются: внедрение автоматической юстировки оптических осей, увеличение жесткости несущих элементов, расширение обучающей выборки для классификатора и применение методов фильтрации измерений дальномера в сложных метеоусловиях.
5. Полученные результаты могут быть использованы при создании мобильных лазерных комплексов противодействия БПЛА, а также в других системах точного наведения оптико-электронных приборов.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0020, госзадание ВлГУ).

Литература

1. Pietrek G. G. Threats to critical infrastructure. The case of unmanned aerial vehicles // Journal of Modern Science. – 2022. – Т. 49. – №. 2. – С. 120-133.
2. Coluccia A., Parisi G., Fascista A. Detection and classification of multirotor drones in radar sensor networks: A review // Sensors. – 2020. – Т. 20. – № 15. – С. 4172.
3. Khawaja W., et al. A survey on detection, tracking, and classification of aerial threats using radars and communications systems // arXiv preprint arXiv:2211.10038. – 2022.

4. Ильин В.А., [и др.] Обзор существующих методов обнаружения и противодействия малым беспилотным летательным аппаратам // Оригинальные исследования. – 2025. – Т.15. – № 1. – С. 197-206.
5. Ратушняк В.Н., Дмитриев Д.Д., Мекаев А.М. К вопросу об обнаружении малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов обзорными радиолокационными станциями // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2025. – Т. 18. – № 2. – С. 258-270.
6. Ahmad B.I., et al. A review of automatic classification of drones using radar: Key considerations, performance evaluation, and prospects // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2023. – Т. 39. – № 2. – С. 18-33.
7. Kuznetsov M.S., Zavitkov A.V., Lyukhter A.B., Loktev A.S., Tatarkin D.Y. Comparative analysis of optical schematics for a laser emitter module designed for high-power-density beam focusing at long distances // Photonics Russia. – 2026. – № 2. – С. 106-119. doi: 10.22184/1993-7296.FRos.2026.20.2.106.118.
8. Zitar R.A., et al. Intensive Review of Drones Detection and Tracking: Linear Kalman Filter Versus Nonlinear Regression, an Analysis Case // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2023. – Т. 30. – № 5. – С. 2811-2830.
9. Клековкин В.А. Исследование моделей сверточных нейронных сетей YOLOv5 и YOLOv8 при детектировании летающих объектов на изображениях // Сборник трудов XXII Международной научно-практической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2025. – С. 378-383.
10. Lukezic A., Zajc L.C., Vojir T., et al. Discriminative correlation filter with channel and spatial reliability // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2017. – С. 6309-6318.