

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Марковский И.М., студент

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Кулага В.В. – канд. техн. наук, доцент

В работе рассматриваются актуальные проблемы обнаружения и сопровождения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с использованием распределенных сетей акустических пеленгаторов. Проанализированы физические ограничения акустического метода локации и предложены алгоритмы фильтрации шумовых выбросов на основе консенсусной выборки. Описана архитектура специализированного программного средства, реализующего автоматизированное построение траекторий целей. Обоснована эффективность применения предложенных программных решений для повышения достоверности мониторинга и защиты объектов критической инфраструктуры.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) самолётного типа с двигателем внутреннего сгорания стали одним из ключевых средств поражения объектов критической инфраструктуры в современных вооружённых конфликтах. Доступность компонентной базы привела к кратному снижению их стоимости и сделала возможным массовое применение, тогда как существующие средства обнаружения создавались под иные классы воздушных целей. Радиолокационные станции уверенно обнаруживают крупные воздушные суда, однако эффективная площадь рассеяния малоразмерного БЛА составляет лишь 0,01–0,1 м² – на пределе возможностей большинства применяемых сегодня РЛС, – а плотное развёртывание высокоточных станций вблизи каждого охраняемого объекта экономически нецелесообразно [1]. Радиотехническая разведка эффективна против аппаратов, непрерывно поддерживающих связь с оператором, но полностью бессильна, когда БЛА летит в автономном режиме по заранее заложенному маршруту [2]. Оптико-электронные системы зависят от погодных условий и не способны эффективно перекрывать воздушное пространство без предварительного целеуказания [3]. На этом фоне акустический метод обнаружения приобретает принципиальные преимущества: он пассивен, не демаскирует наблюдателя, а акустическая сигнатура двигателя внутреннего сгорания неотделима от самого факта полёта и не может быть скрыта переходом в режим радиомолчания [4].

Вместе с тем акустический метод имеет физическое ограничение: дальность уверенного обнаружения БЛА с двигателем внутреннего сгорания не превышает 2–4 км, что делает невозможным контроль протяжённого периметра с помощью одного датчика и диктует необходимость развёртывания пространственно-распределённой сети пеленгаторов [5]. Однако каждый из них фиксирует лишь направление на источник звука, и для получения координат цели необходимо пересечение пеленгов от нескольких узлов одновременно – задача, которая при непрерывном потоке данных в реальном времени не может быть решена вручную и требует автоматизации. В работе с акустической пеленгацией возникает следующая сложность: скорость звука в атмосфере составляет около 343 м/с, тогда как ударный БЛА движется со скоростью 150–200 км/ч, поэтому разнесённые датчики слышат одну и ту же точку траектории в разные моменты времени – и классическая триангуляция синхронных пеленгов неизбежно даёт пространственную ошибку [6].

Анализ кинематики ударных БЛА показывает, что на маршевых участках между поворотными точками маршрута аппарат движется прямолинейно с постоянной скоростью – бортовой автопилот на основе ПИД-регуляторов непрерывно корректирует курс, сводя отклонение от заданного вектора к нулю [7]. Это делает линейную аппроксимацию естественным инструментом для обработки массива сырых точек пересечения пеленгов, однако применять метод наименьших квадратов напрямую нельзя – первичные отметки неизбежно содержат выбросы, к которым он крайне чувствителен. Поэтому сначала, используя алгоритм консенсусной выборки, итеративно отсеиваются аномальные точки, оставляя лишь те, что укладываются на одну прямую в пределах допустимой погрешности. Только после этого, к очищенному массиву применяется МНК для получения уравнения траектории и расчёта курса и скорости объекта [8, 9].

Дополнительную сложность создаёт схожесть акустических сигнатур двигателей внутреннего сгорания БЛА со спектрами наземного моторного транспорта – в результате система может формировать достоверные прямолинейные треки от мотоциклов, грузовиков или моторных лодок. Для решения этой проблемы сформированная траектория должна сопоставляться с полигонами автомобильных дорог и водных артерий. Если траектория объекта совпадает с существующей дорожной сетью или руслом реки, цель классифицируется как ложная, что позволяет повысить достоверность обнаружения воздушных угроз без привлечения дорогостоящих видеодатчиков или радиолокаторов.

Для реализации обозначенных методов и алгоритмов было разработано программное средство, представляющее собой распределённый комплекс, функционирующий по клиент-серверной модели.

Серверная часть, разработанная на языке Rust, выступает ядром вычислительной системы, реализующим строгую ролевую модель доступа. Доступ пользователей к функциям управления и мониторинга разграничен ролями «Командир» и «Оператор» с использованием JWT-токенов, в то время как устройства обнаружения звука (УОЗ) проходят процедуру авторизации в сети по уникальным идентификаторам при иницировании WebSocket-соединения, обеспечивая изоляцию данных и защиту от несанкционированного подключения стороннего оборудования к распределенной сети мониторинга.

Центральный сервер осуществляет агрегацию данных и управление полным жизненным циклом формируемых траекторий, который включает этапы первичной фиксации акустических событий, ассоциацию новых точек обнаружения с существующими целями и расчет прогнозных координат. В процессе сопровождения система динамически управляет состояниями объектов: от «активного отслеживания» до «аппроксимации» при входе цели в «мертвые зоны» или временной потере сигнала.

Функциональная структура разработанного программного средства включает следующие логические модули. Модуль «Планирование» предназначен для конфигурации объектов охраны, средств поражения и расстановки акустических пеленгаторов на карте местности с учетом их технических характеристик и углов обзора. Модуль «Работа» обеспечивает интерактивный мониторинг воздушной обстановки, выполняя в реальном времени кластеризацию датчиков на основе графа смежности и визуализацию треков. Для анализа зафиксированных событий и ведения журналов инцидентов предназначен модуль «Контроль», реализующий сегментированный доступ к данным (по сменам для операторов и полную историю для командиров) с поддержкой экспорта отчетов в формат CSV. Важной частью системы является модуль «Конфигурация», который предоставляет командиру прямой доступ к параметрам математического ядра. В данном режиме осуществляется ручная настройка коэффициентов фильтрации, допусков частотного расхождения пеленгов, минимального количества точек для начала аппроксимации и порогов классификации ложных целей по ГИС-данным. Такая возможность параметризации позволяет адаптировать систему под специфику конкретного рельефа и застройки, исключая эффект «черного ящика».

Клиентская часть программного комплекса реализована в виде одностраничного веб-приложения (SPA) на базе фреймворка Angular. Визуализация данных осуществляется на интерактивной цифровой карте местности (ЦКМ), отрисовка которой выполняется с использованием TileServer GL. Оператор в режиме реального времени получает уведомления об обнаруженных угрозах, видит направление движения целей и их удаленность от защищаемых объектов.

Автоматизация процессов акустического мониторинга в рамках разработанного комплекса позволяет создать эффективный и масштабируемый рубеж защиты. Сочетание методов многопозиционной пеленгации с алгоритмами пространственной фильтрации обеспечивает необходимую достоверность данных без привлечения активных радиолокационных средств. Система позволяет автоматизировать сопровождение целей: роль оператора сводится к принятию решений на основе готовой картины воздушной обстановки и автоматически рассчитанных параметров (курс, скорость, время подлета).

Список использованных источников:

1. Кузьмин, С. З. *Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации* / С. З. Кузьмин. – Москва : Радио и связь, 1986. – 352 с.
2. Кондратьев, В. С. *Многопозиционные радиотехнические системы* / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков. – Москва : Радио и связь, 1986. – 264 с.
3. Liu Y., Zhang H., Wang L., Chen X. *Vision-Based Drone Detection in Complex Environments: A Survey* // *Drones*. – 2024. – Vol. 8, № 11. – P. 643.
4. Макаренко, С. И. *Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография* / С. И. Макаренко. – Санкт-Петербург : Научное издание, 2020. – 206 с.
5. Скучик, Е. *Основы акустики* / Е. Скучик. – Москва : Мир, 1976. – Т. 1. – 520 с.
6. Sedunov A., Sutin A., Sedunov N., Salloum H., Yakubovskiy A., Masters D. *Passive acoustic system for tracking low-flying aircraft* // *IET Radar, Sonar & Navigation*. – 2016. – Vol. 10, № 9. – P. 1561–1568. – DOI: 10.1049/iet-rsn.2016.0159.
7. Бесекерский, В. А. *Теория систем автоматического управления* / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Москва : Профессия, 2003. – 752 с.
8. Бахвалов, Н. С. *Численные методы* / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – 8-е изд. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 636 с.
9. Fischler, M. A. *Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography* / M. A. Fischler, R. C. Bolles // *Communications of the ACM*. – 1981. – Vol. 24, № 6. – P. 381–395.