

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**П.А. КОКУНИН, Д.Е. ЧИКРИН, О.В. ШИНДОР, А.А. ЕГОРЧЕВ
ОПЕРАТОР СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ
БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие



**Казань
2025**

**УДК 21.396.96
ББК 39.52я73
О-77**

*Печатается по рекомендации
Учебно-методической комиссии института Вычислительной
математики и информационных технологий
Казанского (Приволжского) федерального университета
(протокол № 4 от 21 ноября 2025 г.)*

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент А.А.Авксентьев
(Казанский национальный исследовательский технического
университет им. А. Н. Туполева – КАИ)

Начальник молодежного конструкторского бюро, директор ООО
«МАДАГАСКАР» (Производство летательных аппаратов) А.В. Соловьев
(Казанский государственный энергетический университет)

Кокунин П.А., Чикрин Д.Е., Шиндор О.В., Егорчев А.А.

О-77 Оператор систем обнаружения мультироторных беспилотных
авиационных систем: учебное пособие / П.А.Кокунин, Д.Е.Чикрин, О.В.Шиндор,
А.А. Егорчев – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2025. – 360 с.

ISBN

Данное пособие разработано в соответствии с требованиями
дополнительной профессиональной программы повышения квалификации
операторов систем обнаружения мультироторных БАС и является комплексным
руководством по эксплуатации современных технических средств
противодействия несанкционированным полетам. Пособие содержит
теоретические основы радиолокационного, оптического, акустического и
радиоэлектронного обнаружения БАС, а также практические аспекты
применения систем противодействия в соответствии с нормативно-правовой
базой Российской Федерации. Представлен обширный комплекс практических
заний, контрольных вопросов и реальных сценариев для отработки
профессиональных навыков противодействия воздушным угрозам.

Учебное пособие предназначено для слушателей курсов повышения
квалификации операторов систем обнаружения БАС, специалистов служб
безопасности критически важных объектов, преподавателей и инженеров,
работающих в области защиты от воздушных угроз.

**УДК 621.396.96
ББК 39.52я73**

© Издательство Казанского университета, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТЕМА 1. ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС	8
Лекция 1.1: Основы обнаружения воздушных целей	8
Лекция 1.2: Радиолокационные технологии обнаружения	11
Лекция 1.3: Комплексные системы обнаружения	13
ТЕМА 2. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ	21
Лекция 2.1: Принципы радиочастотного мониторинга	21
Лекция 2.2: Анализ сигналов управления БАС	22
Лекция 2.3: Пеленгация источников радиосигналов	23
ТЕМА 3. ОПТИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА	33
Лекция 3.1: Оптические системы обнаружения	33
Лекция 3.2: Тепловизионные и ИК-системы	35
Лекция 3.3: Акустические методы обнаружения	37
ТЕМА 4. СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ	46
Лекция 4.1: Правовые основы противодействия БАС	46
Лекция 4.2: Радиоэлектронное подавление	47
Лекция 4.3: Системы перехвата управления	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие и массовое распространение беспилотных авиационных систем в последние годы привело к появлению нового класса потенциальных угроз для критически важных объектов, массовых мероприятий, режимных территорий и авиационной безопасности. Доступность и относительная простота эксплуатации современных мультироторных БАС существенно расширили круг потенциальных пользователей, среди которых могут быть и лица с противоправными намерениями.

Несанкционированное использование мультикоптеров создает многоплановые риски для различных сфер безопасности. Нарушения работы аэропортов из-за появления дронов в зонах взлета и посадки стали обычным явлением в мировой практике, приводя к задержкам рейсов и значительным экономическим потерям. Использование БАС для несанкционированной съемки режимных объектов, промышленного шпионажа, доставки запрещенных грузов, проведения террористических актов превратило беспилотные системы из технологической новинки в серьезную угрозу безопасности.

Критическая инфраструктура - атомные электростанции, нефтеперерабатывающие заводы, объекты энергетики, транспортная инфраструктура - требует надежной защиты от воздушных угроз. Массовые мероприятия с участием первых лиц государства, спортивные события, культурные форумы нуждаются в обеспечении безопасности воздушного пространства. Государственные границы и режимные территории должны быть защищены от несанкционированного проникновения с использованием БАС.

В ответ на эти вызовы в мире активно развиваются технологии обнаружения и противодействия беспилотным системам. Современный рынок предлагает широкий спектр технических решений - от простых портативных детекторов радиосигналов до сложных многопозиционных комплексов с искусственным интеллектом, объединяющих радиолокационные, оптические, акустические и радиоэлектронные методы обнаружения. Системы противодействия развиваются от простых средств радиоэлектронного подавления до интегрированных решений, обеспечивающих обнаружение, классификацию, сопровождение и нейтрализацию воздушных угроз.

Эффективная эксплуатация систем обнаружения и противодействия требует подготовки высококвалифицированных специалистов, понимающих не только технические аспекты работы оборудования, но и правовые основы

применения, тактические особенности различных угроз, методы интеграции разнородных систем в единый комплекс защиты воздушного пространства.

В Российской Федерации правовое регулирование применения систем обнаружения и противодействия БАС основывается на Воздушном кодексе РФ, законах о безопасности критически важных объектов, национальной безопасности, специальных нормативных актах силовых ведомств. Система подготовки операторов систем обнаружения включает изучение физических принципов работы различных датчиков, технических характеристик оборудования, тактики применения, правовых основ использования средств противодействия.

Данное учебное пособие предназначено для лиц, желающих получить профессиональные знания и навыки в области обнаружения и противодействия мультироторным беспилотным авиационным системам:

слушатели курсов повышения квалификации операторов систем обнаружения БАС в учебных центрах силовых ведомств и специализированных организаций;

сотрудники служб безопасности критически важных объектов - аэропортов, атомных станций, нефтехимических предприятий;

специалисты подразделений охраны государственных границ и режимных территорий;

сотрудники правоохранительных органов, обеспечивающих безопасность массовых мероприятий;

инженерно-технический персонал организаций, эксплуатирующих системы обнаружения и противодействия БАС;

преподаватели учебных заведений, готовящих специалистов в области безопасности.

Основной целью данного учебного пособия является подготовка квалифицированных операторов систем обнаружения и противодействия мультироторным беспилотным авиационным системам, способных профессионально эксплуатировать современные технические средства защиты воздушного пространства для обеспечения безопасности критически важных объектов, массовых мероприятий и режимных территорий.

Для достижения поставленной цели в пособии решаются следующие задачи:

1. формирование понимания угроз - изучение классификации воздушных угроз, создаваемых БАС, анализ тактики применения беспилотных систем

злоумышленниками, понимание уровней опасности для различных типов объектов защиты;

2. освоение физических принципов обнаружения - изучение теоретических основ радиолокации малоразмерных целей, радиочастотного мониторинга, оптического и акустического обнаружения, понимание возможностей и ограничений различных методов;

3. изучение технических средств обнаружения - освоение характеристик и принципов работы радиолокационных станций, систем радиочастотного мониторинга, оптико-электронных и тепловизионных систем, акустических датчиков, комплексных систем обнаружения;

4. развитие навыков эксплуатации оборудования - практическое освоение процедур настройки и калибровки систем обнаружения, методов работы с контрольным оборудованием, анализа данных от различных типов датчиков;

5. формирование тактических компетенций - изучение тактики применения систем обнаружения для защиты различных типов объектов, методов организации эшелонированной обороны воздушного пространства, координации работы нескольких систем;

6. освоение правовых основ применения - глубокое изучение нормативно-правовой базы применения систем обнаружения и противодействия, понимание полномочий и ответственности операторов, процедур документирования применения технических средств;

7. изучение систем противодействия - понимание принципов работы средств радиоэлектронного подавления, систем GPS-спуфинга, методов перехвата управления, физических средств нейтрализации БАС;

8. развитие навыков анализа ситуации - формирование способности быстро оценивать характер угрозы, принимать обоснованные решения о применении соответствующих мер противодействия, прогнозировать развитие ситуации;

9. освоение процедур взаимодействия - изучение методов координации с другими службами безопасности, правоохранительными органами, авиационными властями, алгоритмов передачи информации и запроса помощи;

10. формирование навыков документирования - освоение правил ведения журналов обнаружений, составления актов применения технических средств, подготовки отчетов для контролирующих органов.

Структура пособия построена в соответствии с логикой профессиональной деятельности оператора систем обнаружения - от понимания физических принципов работы различных типов датчиков к освоению конкретных технических систем, от изучения методов обнаружения к практикам

противодействия. Каждая тема включает теоретическую часть с подробными объяснениями принципов работы оборудования, практические занятия с реальными системами обнаружения, разбор типовых и нестандартных ситуаций.

Особое внимание в пособии уделяется правовым аспектам применения систем обнаружения и противодействия, что критически важно для предотвращения превышения полномочий и обеспечения легитимности действий оператора. Детально рассматриваются процедуры документирования обнаружений и применения технических средств, взаимодействия с правоохранительными органами, подготовки материалов для служебных расследований.

Междисциплинарный характер курса обеспечивается интеграцией знаний из области радиофизики, электроники, оптики, акустики, информационных технологий, права, тактики защиты объектов. Такой подход позволяет сформировать у слушателей целостное понимание всех аспектов противодействия воздушным угрозам от БАС.

Практическая направленность курса обеспечивается большим объемом практических занятий (более 60% учебного времени), включающих работу с реальными системами обнаружения, анализ записанных сигналов БАС, отработку процедур классификации целей, моделирование сценариев применения систем противодействия в различных условиях.

ТЕМА 1. ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ БАС

Лекция 1.1: Основы обнаружения воздушных целей

1.1.1. Определение и классификация систем обнаружения БАС

Система обнаружения БАС - программно-аппаратный комплекс, предназначенный для автоматического или автоматизированного обнаружения, классификации и определения координат беспилотных авиационных систем в заданной области воздушного пространства.

Основные задачи систем обнаружения:

1. **Обнаружение** - фиксация факта появления БАС в контролируемой зоне
2. **Классификация** - определение типа и характеристик обнаруженного объекта
3. **Сопровождение** - непрерывное отслеживание траектории движения
4. **Целеуказание** - передача координат для систем противодействия
5. **Документирование** - фиксация всех событий для последующего анализа

Физические принципы обнаружения

Обнаружение мультироторных БАС основано на регистрации различных физических явлений, сопровождающих их полет:

1. Электромагнитные эффекты:

- Радиолокационное отражение от корпуса и вращающихся элементов
- Радиоизлучение систем управления и телеметрии
- Излучение видеопередатчиков

2. Оптические эффекты:

- Отражение видимого света от корпуса
- Тепловое излучение двигателей и электроники
- Изменение фона при движении объекта

3. Акустические эффекты:

- Звук вращающихся пропеллеров
- Эффект Доплера при движении
- Характерный спектр шумов

4. Аэродинамические эффекты:

- Возмущения воздушных потоков
- Завихрения за винтами

- Изменения давления

Таблица 1

Сравнение физических принципов обнаружения

Принцип	Дальность	Точность	Всепогодность	Скрытность
Радиолокация	Высокая	Высокая	Да	Нет
Радиомониторинг	Очень высокая	Средняя	Да	Да
Оптический	Средняя	Очень высокая	Нет	Да
Акустический	Низкая	Низкая	Частично	Да

1.1.2. Особенности мультироторных БАС как целей обнаружения

Размерные характеристики:

- Диаметр: от 15 см (микро-БАС) до 3 м (тяжелые системы)
- Высота: 10-50 см
- Эффективная поверхность отражения: 0,001-0,1 м²

Скоростные характеристики:

- Максимальная скорость: 5-25 м/с
- Типичная скорость полета: 3-8 м/с
- Способность к зависанию и резким маневрам

Высотные характеристики:

- Рабочие высоты: от 1 м до 500 м над поверхностью
- Способность к полету на предельно малых высотах
- Вертикальный взлет и посадка

Классификация систем обнаружения

По физическому принципу:

1. Активные системы:

- Радиолокационные станции
- Лидарные системы
- Активные оптические системы

2. Пассивные системы:

- Радиочастотные мониторы
- Оптические камеры
- Тепловизионные системы
- Акустические датчики

По конфигурации:

- 1. Моностатические** - передатчик и приемник совмещены
- 2. Бистатические** - передатчик и приемник разнесены
- 3. Многопозиционные** - множество разнесенных датчиков

По мобильности:

- Стационарные комплексы
- Мобильные системы
- Портативные устройства

1.1.3. Характеристики эффективности систем обнаружения

Основные показатели качества:

Вероятность правильного обнаружения (Pd) - отношение числа правильно обнаруженных целей к общему числу целей в зоне контроля:

$$P_d = N_{\text{обнаружено}} / N_{\text{всего}}$$

Вероятность ложной тревоги (Pfa) - отношение числа ложных срабатываний к общему числу решений об отсутствии цели:

$$P_{fa} = N_{\text{ложных}} / N_{\text{решений}}$$

Дальность обнаружения - максимальное расстояние, на котором система способна обнаружить цель с заданными характеристиками при определенной вероятности.

Точность определения координат - среднеквадратическое отклонение измеренных координат от истинных значений.

Время реакции системы - интервал от момента появления цели в зоне обзора до выдачи сигнала обнаружения.

ROC-кривая (Receiver Operating Characteristic) - графическая зависимость вероятности правильного обнаружения от вероятности ложной тревоги при изменении порога принятия решения.

Факторы, влияющие на эффективность обнаружения

1. Характеристики цели:

- Размер и форма
- Материал изготовления
- Скорость полета
- Характер траектории

2. Условия окружающей среды:

- Метеорологические условия
- Время суток
- Рельеф местности

- Наличие помех

3. Параметры системы:

- Мощность излучения (для активных систем)
- Чувствительность приемника
- Алгоритмы обработки сигналов
- Качество антенных систем

Лекция 1.2: Радиолокационные технологии обнаружения

1.2.1. Принципы радиолокации малых целей

Радиолокация - область науки и техники, охватывающая методы радиообнаружения объектов и измерения их координат, а также других параметров на основе свойств радиоволн.

Основное уравнение радиолокации:

$$P_r = (P_t \times G_t \times G_r \times \lambda^2 \times \sigma) / ((4\pi)^3 \times R^4 \times L)$$

где:

- P_r - мощность принимаемого сигнала
- P_t - мощность передатчика
- G_t, G_r - коэффициенты усиления передающей и приемной антенн
- λ - длина волны
- σ - эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели
- R - дальность до цели
- L - потери в системе

Особенности обнаружения малых БАС

Проблемы обнаружения мультикоптеров:

1. **Малая ЭПР** - собственная ЭПР корпуса составляет $0,001-0,01 \text{ м}^2$
2. **Низкая скорость** - попадание в зону "слепых" скоростей доплеровских РЛС
3. **Малая высота полета** - маскировка на фоне подстилающей поверхности
4. **Сложный спектр отражений** - модуляция от вращающихся винтов

Характерные особенности радиолокационного портрета мультикоптера:

Таблица 2

ЭПР различных элементов мультикоптера

Элемент	ЭПР, м ²	Вклад в общую ЭПР, %
Корпус	0,005-0,015	40-60
Двигатели (4 шт)	0,002-0,008	20-30
Винты (металлические)	0,001-0,005	10-20
Шасси	0,001-0,003	5-15
Общая ЭПР	0,01-0,03	100

1.2.2. Доплеровские эффекты

Эффект Доплера для движущихся целей:

$$f_d = \pm (2 \times v_r \times f_0) / c$$

где:

- f_d - доплеровский сдвиг частоты
- v_r - радиальная скорость цели
- f_0 - частота зондирующего сигнала
- c - скорость света

Модуляция от вращающихся винтов:

Винты мультикоптера создают характерную доплеровскую модуляцию сигнала с частотой, равной скорости вращения. Это позволяет:

- Выделить мультикоптер среди других объектов
- Определить количество винтов
- Оценить режим полета (зависание, движение)

1.2.3. Современные радиолокационные системы для обнаружения БАС

Импульсно-доплеровские РЛС:

Преимущества:

- Высокая дальность обнаружения (до 10-15 км)
- Точное измерение координат и скорости
- Работа в любых погодных условиях

Недостатки:

- Высокое энергопотребление
- Демаскирующее излучение
- Сложность в исполнении

РЛС непрерывного излучения с ЛЧМ:

Принцип работы основан на излучении сигнала с линейно изменяющейся частотой и анализе разности частот между излученным и принятым сигналами.

Таблица 3

Характеристики современных РЛС для обнаружения БАС

Модель	Дальность	Точность	Частота	Энергопотребление
ELM-2026D	5 км	±10 м	X-band	800 Вт
ARDRONIS	3 км	±5 м	Ku-band	200 Вт
BLIGHTER A400	8 км	±15 м	S-band	1200 Вт
FALCON SHIELD	2 км	±3 м	Ka-band	150 Вт

Многопозиционные системы

Принцип работы:

Использование нескольких разнесенных в пространстве позиций для:

- Повышения точности определения координат
- Устранения зон невидимости
- Классификации целей по множественным ракурсам

Преимущества многопозиционных систем:

- Повышенная помехозащищенность
- Возможность пассивной локации
- Лучшая точность измерения координат
- Классификация по характеристикам рассеяния.

Лекция 1.3: Комплексные системы обнаружения

1.3.1. Принципы построения комплексных систем

Комплексная система обнаружения - интегрированное решение, объединяющее различные физические принципы обнаружения для повышения общей эффективности (см. Рис. 1).





Рис. 1. - Архитектура комплексной системы

1.3.2. Алгоритмы комплексирования информации

Методы объединения данных (Data Fusion):

1. Уровень сигналов - объединение сигналов до обнаружения
2. Уровень признаков - объединение измеренных параметров
3. Уровень решений - объединение результатов классификации

Алгоритм взвешенного голосования:

Итоговое решение = $\Sigma(w_i \times D_i)$

где:

- w_i - весовой коэффициент i -го датчика
- D_i - решение i -го датчика (0 или 1)

Весовые коэффициенты определяются на основе:

- Надежности датчика в текущих условиях
- Истории ложных срабатываний
- Качества принимаемого сигнала

1.3.3. Системы искусственного интеллекта

Применение ИИ для обнаружения БАС:

Машинное обучение для классификации:

- Обучение на базе данных реальных сигналов
- Автоматическое выделение характерных признаков
- Адаптация к новым типам БАС

Нейронные сети для обработки изображений:

- Сверточные сети для анализа видео
- Рекуррентные сети для анализа траекторий
- Генеративно-состязательные сети для синтеза данных

Экспертные системы:

- База знаний о различных типах БАС
- Правила принятия решений
- Система объяснения принятых решений

Интеграция с системами управления

Уровни интеграции:

- 1. Локальный уровень** - объединение датчиков одного объекта
- 2. Территориальный уровень** - сеть систем в регионе
- 3. Центральный уровень** - общегосударственная система

Протоколы обмена данными:

- NATO STANAG 4586 для военных применений
- ASTERIX для гражданской авиации
- Пользовательские протоколы.

Практические занятия по теме 1

Практическое занятие 1.1: Сравнительный анализ технологий обнаружения

Цель занятия: Изучить возможности и ограничения различных технологий обнаружения БАС, провести сравнительный анализ их эффективности.

Оборудование:

- Демонстрационные образцы различных типов датчиков
- Мультикоптеры различных размеров в качестве целей
- Программное обеспечение для анализа данных
- Измерительные приборы

Задание 1: Анализ радиолокационных характеристик (2 часа)

Исходные данные:

- РЛС X-диапазона, мощность 100 Вт
- Мультикоптер DJI Phantom 4, ЭПР $\approx 0,01 \text{ м}^2$
- Условия: ясная погода, открытая местность

Порядок выполнения:

1. Теоретический расчет дальности обнаружения:

Используя уравнение радиолокации:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{(P_t \times G^2 \times \lambda^2 \times \sigma) / ((4\pi)^3 \times P_{\min})}$$

С параметрами:

$$P_t = 100 \text{ Вт}$$

$$G = 30 \text{ дБ (1000 раз)}$$

$$\lambda = 0,03 \text{ м (X-диапазон)}$$

$$\sigma = 0,01 \text{ м}^2$$

$$P_{\min} = -110 \text{ дБм (чувствительность приемника)}$$

2. Практические измерения:

- Размещение РЛС и мультикоптера на известных расстояниях
- Измерение уровня отраженного сигнала
- Анализ доплеровских характеристик
- Построение зависимости мощности сигнала от дальности

3. Сравнение с расчетными данными и анализ расхождений

Задание 2: Исследование оптических методов (2 часа)

Оборудование:

- HD камера с объективом 50 мм

- Тепловизор FLIR
- Мультикоптер с нагретыми двигателями
- Программно-аппаратный комплекс анализа изображений

Методика:

1. **Видео-обнаружение:**
 - Съемка мультикоптера на различных дистанциях (500-2000 м)
 - Анализ видимости в различных условиях освещения
 - Применение алгоритмов детекции движения
2. **Тепловизионное обнаружение:**
 - Регистрация теплового излучения работающих двигателей
 - Измерение контраста цель/фон
 - Анализ зависимости от температуры окружающей среды
3. **Сравнительный анализ:**
 - Построение графиков дальности обнаружения для каждого метода
 - Оценка влияния различных факторов
 - Определение оптимальных условий применения

Задание 3: Акустическое обнаружение (1 час)

Процедура:

1. **Запись акустических сигналов:**
 - Использование направленного микрофона
 - Запись в различных условиях (различные БАС, расстояния, шумы)
 - Частотный анализ полученных сигналов
2. **Создание акустических портретов:**
 - Выделение характерных частотных пиков
 - Анализ гармонического состава
 - Создание базы данных сигнатур
3. **Тестирование алгоритмов распознавания:**
 - Применение фильтров для выделения полезного сигнала
 - Тестирование в условиях городского шума
 - Оценка эффективности различных алгоритмов

Задание 4: Комплексирование данных (1 час)

Создание простого алгоритма комплексирования:

```
IF (radar_detection = TRUE) AND (rf_signature = DRONE)
```

```

    THEN confidence = 0.9
ELSIF (optical_detection = TRUE) AND (acoustic_signature =
DRONE)
    THEN confidence = 0.7
ELSIF (radar_detection = TRUE) OR (optical_detection = TRUE)
    THEN confidence = 0.5
ELSE
    confidence = 0.1

```

Тестирование алгоритма на реальных данных и оценка его эффективности.

Практическое занятие 1.2: Работа с программными средствами анализа

Цель занятия: Освоить программные средства для обработки и анализа данных систем обнаружения БАС.

Программное обеспечение:

- MATLAB/Simulink для обработки сигналов
- OpenCV для анализа изображений
- Audacity для обработки звука
- Специализированное ПО производителей оборудования

Задание 1: Обработка радиолокационных данных (2 часа)

Исходные данные: Файлы с записями радиолокационных сигналов, содержащие смесь полезного сигнала и помех.

Алгоритм обработки:

1. Предварительная фильтрация:

```
% MATLAB код для фильтрации сигнала
[b,a] = butter(6, [0.1 0.9], 'bandpass');
filtered_signal = filter(b, a, raw_signal);
```

2. Обнаружение импульсов:

```
% Пороговое обнаружение
threshold = 3 * std(noise_level);
detected_pulses = abs(filtered_signal) > threshold;
```

3. Измерение доплеровских характеристик:

```
% БПФ для анализа доплеровских частот
doppler_spectrum = fft(pulse_data);
doppler_freq = find(max(abs(doppler_spectrum)));
```

Задание 2: Анализ видеопоследовательностей (2 часа)

Исходные данные: Видеозаписи полетов мультикоптеров в различных условиях.

Алгоритм OpenCV:

```
import cv2
import numpy as np

# Инициализация детектора движения
backSub = cv2.createBackgroundSubtractorMOG2()

# Обработка кадров
for frame in video:
    # Вычисление маски движения
    fgMask = backSub.apply(frame)

    # Поиск контуров
    contours, _ = cv2.findContours(fgMask, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

    # Фильтрация по размеру и форме
    for contour in contours:
        area = cv2.contourArea(contour)
        if 100 < area < 5000: # Размер типичного мультикоптера
            # Дополнительная классификация
            aspect_ratio = calculate_aspect_ratio(contour)
            if 0.8 < aspect_ratio < 1.2: # Близко к квадрату
                # Отметка обнаружения
                mark_detection(frame, contour)
```

Задание 3: Спектральный анализ акустических сигналов (1 час)

Создание фильтра для выделения сигналов мультикоптера:

```
import scipy.signal
import numpy as np

# Параметры фильтра для частоты винтов (50-200 Гц)
def design_drone_filter(sample_rate):
    low_freq = 50 / (sample_rate / 2)
    high_freq = 200 / (sample_rate / 2)
    b, a = scipy.signal.butter(4, [low_freq, high_freq],
btype='band')
    return b, a

# Применение фильтра
```

```

filtered_audio = scipy.signal.filtfilt(b, a, raw_audio)

# Поиск характерных пиков
frequencies, spectrum = scipy.signal.welch(filtered_audio,
sample_rate)
peaks, _ = scipy.signal.find_peaks(spectrum, height=threshold)

```

Задание 4: Интеграция различных источников данных (1 час)

Создание простой системы комплексирования:

```

class DetectionFusion:
    def __init__(self):
        self.radar_weight = 0.4
        self.optical_weight = 0.3
        self.acoustic_weight = 0.2
        self.rf_weight = 0.1

    def fuse_detections(self, radar_conf, optical_conf,
acoustic_conf, rf_conf):
        total_confidence = (self.radar_weight * radar_conf +
                            self.optical_weight * optical_conf +
                            self.acoustic_weight * acoustic_conf
+
                            self.rf_weight * rf_conf)

    return total_confidence > 0.5 # Порог принятия решения

```

Контрольные вопросы по теме 1

1. Какие физические принципы лежат в основе обнаружения мультикоптеров?
2. Почему малые БАС сложно обнаружить с помощью обычных радаров?
3. Что такое эффективная площадь рассеяния и от чего она зависит?
4. Как доплеровские эффекты помогают в обнаружении БАС?
5. Какие преимущества дают многопозиционные системы?
6. Что такое комплексирование данных и зачем оно необходимо?
7. Какие алгоритмы ИИ применяются для обнаружения БАС?
8. Как оценивается качество работы системы обнаружения?

ТЕМА 2. РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА ОБНАРУЖЕНИЯ

Лекция 2.1: Принципы радиочастотного мониторинга

2.1.1. Основы радиочастотного мониторинга

Радиочастотный мониторинг - пассивный метод обнаружения БАС путем перехвата и анализа радиосигналов, излучаемых системами управления, телеметрии и видеопередачи.

Преимущества РЧ-мониторинга:

- Большая дальность обнаружения (до 20-30 км)
- Пассивность (скрытность работы)
- Возможность классификации по радиосигнатурам
- Определение параметров канала управления

Недостатки:

- Зависимость от излучения БАС
- Влияние помех и замираний
- Сложность определения точных координат

2.1.2. Частотные диапазоны БАС

Таблица 4

Частотные диапазоны, используемые мультикоптерами

Назначение	Частота	Мощность	Дальность	Особенности
Управление	2.4 ГГц	10-100 мВт	1-5 км	FHSS, широкий спектр
Управление (дальняя связь)	433/868/915 МГц	100-1000 мВт	10-40 км	Узкополосная
Видеопередача	5.8 ГГц	25-600 мВт	1-8 км	Аналоговая/цифровая
Телеметрия	433/915 МГц	10-100 мВт	5-15 км	Низкая скорость
GPS L1	1575.42 МГц	Прием	-	Навигация

2.1.3. Характеристики сигналов управления

Протоколы радиоуправления:

1. PCM (Pulse Code Modulation)

- Цифровое кодирование команд управления
- Высокая помехозащищенность

- Возможность шифрования

2. FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

- Псевдослучайная смена частот
- Повышенная защита от помех
- Сложность перехвата

3. DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

- Расширение спектра прямой последовательностью
- Низкая спектральная плотность мощности
- Устойчивость к узкополосным помехам

Современные системы FHSS

Алгоритм анализа FHSS сигналов:

1. Широкополосное сканирование диапазона 2.4 ГГц
2. Обнаружение коротких импульсов (hop'ов)
3. Определение последовательности смены частот
4. Синхронизация с псевдослучайной последовательностью
5. Декодирование передаваемых данных.

Лекция 2.2: Анализ сигналов управления БАС

2.2.1. Структура сигналов управления

Типовой пакет управления мультикоптером:

[Преамбула][Адрес][Команды каналов][Телеметрия][Контрольная сумма]

8 бит 16 бит 64 бита 32 бита 8 бит

Команды каналов управления:

- Throttle (газ): 1000-2000 мкс ШИМ
- Aileron (элероны): 1000-2000 мкс
- Elevator (руль высоты): 1000-2000 мкс
- Rudder (руль направления): 1000-2000 мкс
- Auxiliary (вспомогательные): дискретные значения

2.2.2. Идентификация производителей

Характерные особенности сигналов различных производителей представлены в таблице 2.2.

Таблица 5

Радиосигнатуры популярных[2] систем управления

Система	Частота	Протокол	Мощность	Особенности
DJI Lightbridge	2.4/5.8 ГГц	Проприетарный	100 мВт	Адаптивная антенна
FrSky X9D	2.4 ГГц	ACCST	100 мВт	Телеметрия
Spektrum DX	2.4 ГГц	DSM/DSMX	100 мВт	Расширенный спектр
TBS Crossfire	868/915 МГц	CRSF	1000 мВт	Дальняя связь

2.2.3. Анализ телеметрических данных

MAVLink протокол - стандарт телеметрии:

Структура сообщения MAVLink:

[STX][LEN][SEQ][SYSID][COMPID][MSGID][PAYLOAD][CRC1][CRC2]

Основные типы сообщений:

- HEARTBEAT - индикация работы системы
- GPS_RAW_INT - данные GPS
- ATTITUDE - ориентация БАС
- VFR_HUD - основные параметры полета

Расшифровка может дать информацию о:

- Типе БАС
- Текущих координатах
- Высоте и скорости полета
- Маршруте полета
- Остатке топлива/заряда.

Лекция 2.3: Пеленгация источников радиосигналов

2.3.1. Методы радиопеленгации

Радиопеленгация - определение направления на источник радиоизлучения с помощью приемника с направленными свойствами.

Основные методы:

1. Амплитудная пеленгация

- Использование остронаправленных антенн
- Поиск максимума принимаемого сигнала
- Простота реализации

- Низкая точность ($\pm 5\text{-}10^\circ$)

2. Фазовая пеленгация

- Измерение разности фаз на разнесенных антенах
- Высокая точность ($\pm 1\text{-}2^\circ$)
- Требует синхронизации каналов
- Ограничения по частоте

3. Интерферометрическая пеленгация

- Использование антенных решеток
- Очень высокая точность ($\pm 0.1\text{-}0.5^\circ$)
- Высокая сложность реализации

2.3.2. Антенные системы для пеленгации

Фазированные антенные решетки (ФАР):

Принцип работы основан на управлении фазами сигналов отдельных элементов решетки для формирования луча в нужном направлении.

Преимущества ФАР:

- Электронное сканирование (без механических поворотов)
- Высокая скорость перенацеливания
- Возможность одновременного формирования нескольких лучей
- Высокая помехозащищенность

Расчет направления прихода сигнала:

$$\theta = \arcsin(\lambda \times \Delta\phi / (2\pi \times d))$$

где:

- θ - угол прихода сигнала
- λ - длина волны
- $\Delta\phi$ - разность фаз между элементами
- d - расстояние между элементами

2.3.3. Треугольная пеленгация

Определение координат источника:

При наличии трех пеленгаторов координаты источника определяются как точка пересечения пеленгов.

Математическое решение:

Система уравнений прямых:

$$y - y_1 = \operatorname{tg}(\alpha_1) \times (x - x_1)$$

$$y - y_2 = \operatorname{tg}(\alpha_2) \times (x - x_2)$$

$$y - y_3 = \operatorname{tg}(\alpha_3) \times (x - x_3)$$

где $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ - координаты пеленгаторов, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - измеренные пеленги.

Точность определения координат зависит от:

- Точности измерения пеленгов
- Геометрии расположения пеленгаторов
- Дальности до источника

Практические занятия по теме 2

Практическое занятие 2.1: Работа с РЧ-анализаторами

Цель занятия: Освоить методики работы с радиочастотными анализаторами для обнаружения и классификации сигналов БАС.

Оборудование:

- Анализатор спектра Rohde & Schwarz FSW
- Комплект антенн (всенаправленные, секторные, остронаправленные)
- Программное обеспечение для анализа
- Мультикоптеры с различными системами управления

Задание 1: Настройка анализатора спектра

Параметры настройки:

1. **Частотный диапазон:** 2.4-2.485 ГГц (полный ISM диапазон)
2. **Полоса разрешения (RBW):** 100 кГц для обзорного анализа
3. **Полоса видео (VBW):** 1 МГц
4. **Время развертки:** 100 мс - 1 с в зависимости от задач
5. **Детектор:** Peak detector для импульсных сигналов

Калибровка:

- Подключение генератора известной частоты
- Проверка точности измерения частоты (± 1 кГц)
- Калибровка уровня сигнала (± 1 дБ)

Задание 2: Обнаружение и анализ сигналов управления

Методика сканирования:

1. **Обзорное сканирование диапазона 2.4 ГГц:**
 - Поиск активных каналов
 - Идентификация WiFi сетей (исключение ложных сигналов)
 - Выделение потенциальных сигналов БАС
2. **Детальный анализ обнаруженных сигналов:**

Алгоритм идентификации:

1. Измерение центральной частоты
 2. Определение ширины спектра
 3. Анализ временной структуры (длительность импульсов)
 4. Выявление периодических структур
 5. Сравнение с базой данных известных протоколов
3. **Классификация по типу протокола:**

- Анализ характера модуляции
- Измерение периода повторения
- Определение структуры пакетов
- Сравнение с эталонными сигналами

Задание 3: Долговременный мониторинг радиоэфира

Настройка автоматизированной системы:

- Программирование сценариев сканирования:**
 - Циклическое сканирование приоритетных частот
 - Автоматическое обнаружение новых сигналов
 - Запись подозрительной активности
- Создание базы данных обнаружений:**

```
CREATE TABLE rf_detections (
    id INTEGER PRIMARY KEY,
    timestamp DATETIME,
    frequency REAL,
    power_level REAL,
    modulation TEXT,
    duration INTEGER,
    classification TEXT,
    operator_id INTEGER
);
```

- Анализ статистики активности:**
 - Построение графиков по времени
 - Корреляция с известными полетами
 - Выявление аномальной активности

Задание 4: Измерение характеристик сигналов

Измеряемые параметры:

Таблица 6

Измеряемые характеристики сигналов

Параметр	Метод измерения	Точность	Применение
Центральная частота	Маркер пика	±1 кГц	Идентификация канала
Ширина спектра	Метод -3дБ	±5%	Тип модуляции
Мощность	Интегрирование спектра	±1 дБ	Расчет дальности
Время активности	Временные метки	±1 мс	Анализ режимов

Параметр	Метод измерения	Точность	Применение
FHSS последовательность	Корреляционный анализ	-	Классификация

Окончание табл. 6

Практическое занятие 2.2: Пеленгация источников сигналов

Цель занятия: Освоить методы определения направления на источники радиосигналов БАС.

Оборудование:

- Трехканальный пеленгатор
- Комплект направленных антенн
- Мобильная радиостанция в качестве источника сигнала
- GPS-приемники для определения координат
- Программное обеспечение пеленгации

Задание 1: Настройка системы пеленгации

Калибровка антенной системы:

1. **Проверка идентичности каналов:**
 - Подача одного сигнала на все каналы
 - Измерение амплитудных и фазовых различий
 - Расчет поправочных коэффициентов
2. **Калибровка направления:**
 - Размещение источника в известном направлении
 - Измерение показаний пеленгатора
 - Внесение поправок на истинное направление

Задание 2: Амплитудная пеленгация

Принцип работы:

Использование остронаправленной антенны для поиска направления максимального сигнала.

Практическая процедура:

1. **Установка источника сигнала на известном расстоянии (1 км)**
2. **Поворот антенны с шагом 5°**
3. **Измерение уровня сигнала в каждом положении**
4. **Построение диаграммы направленности**
5. **Определение направления максимума**

Точность измерения: $\pm 2\text{-}3^\circ$ при отношении сигнал/шум > 20 дБ.

Задание 3: Фазовая пеленгация

Принцип измерения:

Разность фаз между антеннами, разнесеными на расстояние d :

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda) \times d \times \sin(\theta)$$

Практическая реализация:

1. **Размещение двух антенн на расстоянии $\lambda/2$**
2. **Синхронное измерение фаз принимаемых сигналов**
3. **Расчет направления по формуле:**

$$\theta = \arcsin(\Delta\phi \times \lambda / (2\pi \times d))$$

Повышение точности:

- Использование нескольких пар антенн
- Цифровая обработка сигналов
- Калибровка по эталонным направлениям

Задание 4: Триангуляция координат

Исходные данные:

- Координаты трех пеленгаторов
- Измеренные пеленги с каждого поста
- Оценка точности измерений

Алгоритм расчета:

```
import numpy as np
from scipy.optimize import minimize

def triangulation(positions, bearings, bearing_errors):
    """
    positions: координаты пеленгаторов [[x1,y1], [x2,y2],
    [x3,y3]]
    bearings: измеренные пеленги [α1, α2, α3] в радианах
    bearing_errors: ошибки измерения пеленгов
    """

    def target_function(target_pos):
        error_sum = 0
        for i, (pos, bearing, error) in enumerate(zip(positions, bearings, bearing_errors)):
            calculated_bearing = np.arctan2(target_pos[1] - pos[1],
                                              target_pos[0] - pos[0])
            error_sum += ((calculated_bearing - bearing) / error) ** 2
    return error_sum
```

```

        return error_sum

    # Начальная оценка как центр пеленгаторов
    initial_guess = np.mean(positions, axis=0)

    result      = minimize(target_function,      initial_guess,
method='BFGS')
    return result.x

```

Оценка точности триангуляции:

- Расчет теоретической точности
- Сравнение с истинными координатами
- Анализ влияния геометрического фактора.

Практическое занятие 2.3: Создание базы данных радиосигнатур

Цель занятия: Создать базу данных радиосигнатур различных типов БАС для автоматической классификации.

Задание 1: Сбор эталонных сигналов

Объекты исследования:

- DJI Phantom 4 (популярная потребительская модель)
- DJI Mavic Air (компактная модель)
- Самодельный квадрокоптер на ArduPilot
- Гоночный квадрокоптер на Betaflight
- Гексакоптер для профессиональной съемки

Методика сбора данных:

1. Запись в контролируемых условиях:

- Расстояние от источника: 100, 500, 1000 м
- Различные режимы полета (висение, перемещение, маневры)
- Продолжительность записи: 5 минут для каждого режима

2. Обработка записей:

```

# Параметры для каждого сигнала
signal_parameters = {
    'center_frequency': 0,          # Центральная частота, МГц
    'bandwidth': 0,                # Ширина спектра, МГц
    'peak_power': 0,               # Пиковая мощность, дБм
    'duty_cycle': 0,               # Скважность, %
    'modulation_type': '',         # Тип модуляции
    'hop_rate': 0,                 # Скорость FHSS, hop/s
    'packet_structure': '',         # Структура пакетов
    'unique_features': []          # Уникальные особенности
}

```

Задание 2: Анализ характерных признаков

Автоматическое выделение признаков:

```
import scipy.signal
import numpy as np

def extract_features(signal_data, fs):
    """Извлечение характерных признаков сигнала"""

    # Спектральные признаки
    frequencies, psd = scipy.signal.welch(signal_data, fs)
    peak_frequency = frequencies[np.argmax(psd)]
    bandwidth_3db = calculate_3db_bandwidth(frequencies, psd)

    # Временные признаки
    envelope = np.abs(scipy.signal.hilbert(signal_data))
    pulse_width = calculate_pulse_width(envelope)
    repetition_rate = calculate_repetition_rate(envelope)

    # FHSS анализ
    hop_rate, hop_bandwidth = analyze_fhss(signal_data, fs)

    return {
        'peak_freq': peak_frequency,
        'bandwidth': bandwidth_3db,
        'pulse_width': pulse_width,
        'rep_rate': repetition_rate,
        'hop_rate': hop_rate,
        'hop_bw': hop_bandwidth
    }
```

Задание 3: Создание классификатора

Алгоритм на основе решающих деревьев:

```
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
from sklearn.model_selection import train_test_split

# Подготовка данных
X = features_matrix # Матрица признаков
y = drone_labels # Метки классов БАС

# Разделение на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y,
test_size=0.3)

# Обучение классификатора
classifier = DecisionTreeClassifier(max_depth=5,
random_state=42)
classifier.fit(X_train, y_train)

# Проверка точности
accuracy = classifier.score(X_test, y_test)
```

```
print(f"Точность классификации: {accuracy:.2%}")
```

Контрольные вопросы по теме 2

1. В каких частотных диапазонах работают системы управления мультикоптерами?
2. Что такое FHSS и как этот протокол влияет на обнаружение?
3. Какие методы радиопеленгации наиболее точны?
4. Как расшифровать телеметрические данные MAVLink?
5. Что позволяет различать сигналы разных производителей БАС?
6. Как работает триангуляционная пеленгация?
7. Какие характерные признаки используются для классификации сигналов?
8. Какие факторы ограничивают дальность РЧ-обнаружения?

ТЕМА 3. ОПТИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА

Лекция 3.1: Оптические системы обнаружения

3.1.1. Физические основы оптического обнаружения

Оптическое обнаружение БАС основано на регистрации отраженного или собственного излучения в видимом и инфракрасном диапазонах спектра.

Спектральные диапазоны:

- Видимый свет: 380-780 нм
- Ближний ИК: 780-1400 нм
- Средний ИК: 3-8 мкм (атмосферное окно)
- Дальний ИК: 8-14 мкм (тепловое излучение)

Контраст цель/фон - основной параметр, определяющий возможность обнаружения:

$$C = (L_{\text{цели}} - L_{\text{фона}}) / L_{\text{фона}}$$

где L - яркость объекта.

3.1.2. Современные камерные системы

Параметры современных камер для обнаружения БАС приведены в таблице 3.1.

Таблица 7

Характеристики камерных систем

Тип системы	Разрешение	Частота кадров	Дальность	Особенности
HD видеокамера	1920×1080	30-60 fps	1-2 км	Высокое разрешение
4K камера	3840×2160	30 fps	2-3 км	Детальность
Высокоскоростная	640×480	1000+ fps	0,5-1 км	Быстрые объекты
Панорамная	4000×3000	15 fps	1,5-2,5 км	Широкий обзор

3.1.3. Алгоритмы обработки видеоизображений

Детекция движения:

Алгоритм Background Subtraction:

```
import cv2
```

```
# Инициализация модели фона
bg_model = cv2.createBackgroundSubtractorMOG2(
    detectShadows=True,
```

```

        varThreshold=50,
        history=200
    )

def detect_motion(frame):
    # Применение модели фона
    fg_mask = bg_model.apply(frame)

    # Морфологические операции для очистки
    kernel      = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE,
(5,5))
    fg_mask      = cv2.morphologyEx(fg_mask,      cv2.MORPH_OPEN,
kernel)

    # Поиск контуров
    contours, _ = cv2.findContours(fg_mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
                                    cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

    detections = []
    for contour in contours:
        area = cv2.contourArea(contour)
        if MIN_AREA < area < MAX_AREA:
            # Вычисление параметров объекта
            x, y, w, h = cv2.boundingRect(contour)
            center = (x + w//2, y + h//2)
            detections.append({
                'center': center,
                'area': area,
                'bbox': (x, y, w, h)
            })

    return detections

```

Системы автоматического сопровождения

Алгоритм Kalman Filter для прогнозирования траектории:

Состояние объекта: $X = [x, y, vx, vy]$

Prediction step:

$$X(k|k-1) = F \times X(k-1|k-1) + B \times u(k)$$

$$P(k|k-1) = F \times P(k-1|k-1) \times F^T + Q$$

Update step:

$$K(k) = P(k|k-1) \times H^T \times (H \times P(k|k-1) \times H^T + R)^{-1}$$

$$X(k|k) = X(k|k-1) + K(k) \times (z(k) - H \times X(k|k-1))$$

где:

F - матрица перехода состояния

H - матрица наблюдения

Q - ковариация шума процесса

R - ковариация шума измерений.

Лекция 3.2: Тепловизионные и ИК-системы

3.2.1. Принципы тепловизионного обнаружения

Тепловизионное обнаружение основано на регистрации собственного теплового излучения БАС в инфракрасном диапазоне спектра.

Источники теплового излучения в мультикоптерах:

- Двигатели (нагрев до 80-100°C)
- Регуляторы ESC (до 70-90°C)
- Аккумуляторы (до 40-60°C под нагрузкой)
- Электронные компоненты

Закон Планка для теплового излучения:

$$B(\lambda, T) = \left(\frac{2hc^2}{\lambda^5} \right) \times \frac{1}{e^{(hc/\lambda kT)} - 1}$$

где:

- B - спектральная плотность излучения
- h - постоянная Планка
- c - скорость света
- λ - длина волны
- k - постоянная Больцмана
- T - абсолютная температура

3.2.2. Характеристики современных тепловизоров

Основные параметры тепловизионных систем:

NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) - эквивалентная шуму разность температур, характеризующая чувствительность.

Для обнаружения БАС требуется: NETD < 50 мК.

Таблица 8

Характеристики тепловизоров для систем обнаружения БАС

Модель	Разрешение	NETD	Спектральный диапазон	Дальность БАС
FLIR A65	640×512	<50 мК	7.5-13 мкм	1,5 км
Axis Q19-E	640×480	<40 мК	8-14 мкм	1,2 км
GUIDE IR510	400×300	<60 мК	8-14 мкм	800 м
Dahua TPC-BF5421	640×512	<40 мК	8-14 мкм	1,8 км

3.2.3. Обработка тепловизионных изображений

Адаптивная пороговая сегментация:

```
def adaptive_thermal_detection(thermal_frame,
background_temp):
    """
    Обнаружение горячих объектов на тепловизионном кадре
    """
    # Нормализация температур
    normalized = (thermal_frame - background_temp) / background_temp

    # Адаптивный порог
    mean_temp = np.mean(normalized)
    std_temp = np.std(normalized)
    threshold = mean_temp + 3 * std_temp

    # Бинаризация
    binary_mask = normalized > threshold

    # Поиск связных компонент
    labeled, num_features = label(binary_mask)

    detections = []
    for i in range(1, num_features + 1):
        component = (labeled == i)
        area = np.sum(component)

        # Фильтрация по размеру
        if MIN_THERMAL_AREA < area < MAX_THERMAL_AREA:
            centroid = calculate_centroid(component)
            max_temp = np.max(thermal_frame[component])
            detections.append({
                'position': centroid,
                'area': area,
                'temperature': max_temp
            })

    return detections
```

Атмосферные ограничения

Факторы, влияющие на дальность ИК-обнаружения:

1. **Молекулярное поглощение** - поглощение ИК-излучения молекулами воды и CO₂
2. **Аэрозольное рассеяние** - влияние частиц пыли, дыма, тумана
3. **Турбулентность** - искажения изображения из-за неоднородностей атмосферы

Модель ослабления в атмосфере:

$$\tau = e^{(-\alpha \times R)}$$

где:

- τ - коэффициент пропускания атмосферы
- α - коэффициент ослабления
- R – дальность.

Лекция 3.3: Акустические методы обнаружения

3.3.1. Акустические характеристики мультикоптеров

Источники звука в мультикоптерах:

1. **Аэродинамический шум винтов:**
 - Основная частота: $f = n \times N / 60$ (Гц)
 - где n - обороты в минуту, N - количество лопастей
2. **Гармоники основной частоты:**
 - Первая гармоника: $2 \times f$
 - Вторая гармоника: $3 \times f$
 - Высшие гармоники с убывающей амплитудой
3. **Широкополосный шум:**
 - Тurbулентность воздушного потока
 - Взаимодействие винтов с воздухом
 - Вибрации конструкции

Таблица 9

Акустические характеристики различных БАС

Тип БАС	Диаметр винта	Обороты	Основная частота	Уровень звука
DJI Mini	4.7"	8000 об/мин	~133 Гц	68 дБА
DJI Mavic	8.3"	5500 об/мин	~92 Гц	72 дБА
DJI Phantom	9.4"	4800 об/мин	~80 Гц	75 дБА
Гексакоптер	12"	3500 об/мин	~58 Гц	78 дБА

3.3.2. Системы акустической локации

Принцип работы акустических локаторов:

Использование массива микрофонов для определения направления на источник звука методом измерения временных задержек.

Time Difference of Arrival (TDOA):

$$\Delta t = (d \times \sin(\theta)) / c$$

где:

- Δt - временная задержка между микрофонами
- d - расстояние между микрофонами
- θ - угол прихода звука
- c – скорость звука (≈ 340 м/с)

Точность определения направления:

$$\sigma\theta = (c \times \sigma t) / (d \times \cos(\theta))$$

где σt - точность измерения временной задержки.

3.3.3. Обработка акустических сигналов

Цифровая фильтрация:

Полосовой фильтр для выделения сигналов БАС:

```
from scipy import signal
```

```
def design_drone_filter(fs, low_freq=50, high_freq=200):
    """Проектирование фильтра для выделения звука дронов"""

    nyquist = fs / 2
    low = low_freq / nyquist
    high = high_freq / nyquist
```

```
# Фильтр Баттервортса 6-го порядка
b, a = signal.butter(6, [low, high], btype='band')
return b, a
```

```
def apply_drone_filter(audio_data, fs):
```

```
    """Применение фильтра к звуковому сигналу"""
    b, a = design_drone_filter(fs)
    filtered = signal.filtfilt(b, a, audio_data)
    return filtered
```

Спектральный анализ для классификации:

```
def classify_by_spectrum(audio_segment, fs):
```

```
    """Классификация по акустическому спектру"""

    # Вычисление спектрограммы
    f, t, Sxx = signal.spectrogram(audio_segment, fs,
```

```
nperseg=1024)
```

```
# Поиск доминирующих частот
```

```
dominant_freqs = []
for i in range(len(t)):
    spectrum_slice = Sxx[:, i]
    peak_idx = np.argmax(spectrum_slice)
    dominant_freqs.append(f[peak_idx])
```

```
# Анализ стабильности частоты (характерно для дронов)
```

```
freq_std = np.std(dominant_freqs)
```

```
mean_freq = np.mean(dominant_freqs)
```

```
# Классификация
if 50 < mean_freq < 200 and freq_std < 10:
    return "DRONE_DETECTED"
else:
    return "OTHER_AIRCRAFT"
```

Ограничения акустических методов

Дальность обнаружения: 100-500 м в зависимости от:

- Уровня фонового шума
- Размера и мощности БАС
- Метеорологических условий
- Характеристик акустической системы

Влияние погодных условий:

- Ветер: снижение дальности на 30-50%
- Дождь: дополнительные помехи
- Снег: поглощение высоких частот
- Туман: незначительное влияние.

Практические занятия по теме 3

Практическое занятие 3.1: Настройка оптических систем

Цель занятия: Изучить методики настройки и калибровки оптических систем обнаружения БАС.

Оборудование:

- PTZ-камера с переменным фокусным расстоянием
- Термовизионная камера
- Система автоматического сопровождения целей
- Калибровочные мишени

Задание 1: Геометрическая калибровка камеры

Цель: Определить внутренние параметры камеры для точного измерения координат.

Процедура калибровки:

1. **Подготовка калибровочной доски:**
 - Шахматная доска 8×6 углов
 - Размер клетки: 30×30 мм
 - Плоскость доски должна быть строго ровной
2. **Съемка калибровочных кадров:**
 - 15-20 кадров с различных ракурсов
 - Покрытие всего поля зрения камеры
 - Различные расстояния до доски
3. **Обработка калибровочных данных:**

```
import cv2
import numpy as np

# Подготовка точек объекта (углы доски)
objp = np.zeros((6*8,3), np.float32)
objp[:, :2] = np.mgrid[0:8,0:6].T.reshape(-1,2) * 30 # размер
клетки 30мм

objpoints = [] # 3D точки в пространстве
imgpoints = [] # 2D точки на изображении

for image in calibration_images:
    gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    # Поиск углов шахматной доски
    ret, corners = cv2.findChessboardCorners(gray, (8,6), None)

    if ret:
        objpoints.append(objp)
        imgpoints.append(corners)
```

```

# Калибровка камеры
ret, camera_matrix, dist_coeffs, rvecs, tvecs =
cv2.calibrateCamera(
    objpoints, imgpoints, gray.shape[::-1], None, None)

print(f"Фокусное расстояние: fx={camera_matrix[0,0]:.1f}, fy={camera_matrix[1,1]:.1f}")
print(f"Главная точка: cx={camera_matrix[0,2]:.1f}, cy={camera_matrix[1,2]:.1f}")
print(f"Коэффициенты дисторсии: {dist_coeffs.flatten()}")

```

Задание 2: Определение координат объектов

Преобразование пиксельных координат в метрические:

При известной высоте полета h и калиброванной камере:

```

def pixel_to_world_coordinates(pixel_x, pixel_y, height,
camera_matrix):
    """Преобразование пиксельных координат в мировые"""

    fx = camera_matrix[0, 0] # Фокусное расстояние по X
    fy = camera_matrix[1, 1] # Фокусное расстояние по Y
    cx = camera_matrix[0, 2] # Главная точка X
    cy = camera_matrix[1, 2] # Главная точка Y

    # Преобразование в координаты камеры
    x_cam = (pixel_x - cx) * height / fx
    y_cam = (pixel_y - cy) * height / fy

    return x_cam, y_cam

```

Задание 3: Тестирование алгоритмов обнаружения

Сценарии тестирования:

1. **Одиночный мультикоптер на чистом фоне**
2. **Мультикоптер на сложном фоне (деревья, здания)**
3. **Несколько объектов одновременно**
4. **Быстро движущийся объект**
5. **Объект в условиях плохой видимости**

Метрики оценки:

- Precision = $TP / (TP + FP)$
- Recall = $TP / (TP + FN)$
- F1-score = $2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall)$

где TP - истинно положительные, FP - ложно положительные, FN - ложно отрицательные обнаружения.

Задание 4: Интеграция оптических и тепловизионных данных

Алгоритм совмещения изображений:

```
def      fuse_optical_thermal(optical_frame,      thermal_frame,
transformation_matrix):
    """Совмещение оптического и теплового изображений"""

    # Геометрическое выравнивание
    aligned_thermal = cv2.warpPerspective(thermal_frame,
transformation_matrix,
optical_frame.shape[:2][::-1])

    # Создание составного изображения
    fused = np.zeros_like(optical_frame)
    fused[:, :, 0] = optical_frame[:, :, 0]      # Красный канал -
оптика
    fused[:, :, 1] = optical_frame[:, :, 1]      # Зеленый канал -
оптика
    fused[:, :, 2] = aligned_thermal             # Синий канал - тепло

    return fused
```

Практическое занятие 3.2: Акустические системы

Цель занятия: Освоить методы акустического обнаружения БАС и создания систем звуковой локации.

Задание 1: Запись и анализ акустических сигнатур

Оборудование:

- Массив из 4 направленных микрофонов
- Звукозаписывающее оборудование с частотой дискретизации 48 кГц
- Различные типы мультикоптеров
- Программное обеспечение для спектрального анализа

Методика записи:

1. **Размещение микрофонов:**
 - Квадратная конфигурация 2×2 м
 - Высота установки: 1.5 м от земли
 - Направление: вертикально вверх
2. **Сценарии записи для каждого БАС:**
 - Зависание на высоте 50 м, время 2 минуты
 - Горизонтальный пролет на скорости 5 м/с
 - Вертикальный взлет и посадка
 - Маневры с изменением скорости

3. Спектральный анализ:

```
import librosa
import numpy as np

def analyze_drone_audio(audio_file, fs=48000):
    """Анализ акустической сигнатуры дрона"""

    # Загрузка аудио
    y, sr = librosa.load(audio_file, sr=fs)

    # Вычисление спектрограммы
    D = librosa.amplitude_to_db(np.abs(librosa.stft(y)), ref=np.max)

    # Поиск доминирующих частот
    freqs = librosa.fft_frequencies(sr=sr)
    times = librosa.frames_to_time(np.arange(D.shape[1]))

    # Средний спектр
    mean_spectrum = np.mean(D, axis=1)

    # Поиск пиков
    peaks, properties = scipy.signal.find_peaks(mean_spectrum,
                                                height=-40,
                                                distance=10)

    peak_frequencies = freqs[peaks]
    peak_amplitudes = mean_spectrum[peaks]

    return {
        'fundamental_freq': peak_frequencies[0],
        'harmonics': peak_frequencies[1:],
        'amplitudes': peak_amplitudes,
        'total_energy': np.sum(np.power(10, mean_spectrum/10))
    }
```

Задание 2: Реализация системы звуковой локации

Алгоритм TDOA (Time Difference of Arrival):

```
def acoustic_localization(audio_channels, mic_positions, fs):
    """
    Определение координат источника звука методом TDOA

    audio_channels: список аудио сигналов с каждого микрофона
    mic_positions: координаты микрофонов [(x1, y1, z1),
    (x2, y2, z2), ...]
    fs: частота дискретизации
    """

    # Вычисление взаимной корреляции между каналами
    def cross_correlation(sig1, sig2):
        correlation = np.correlate(sig1, sig2, mode='full')
```

```

delay = np.argmax(correlation) - len(sig2) + 1
return delay / fs # Задержка в секундах

# Измерение временных задержек
delays = []
for i in range(len(audio_channels)):
    for j in range(i+1, len(audio_channels)):
        delay = cross_correlation(audio_channels[i],
audio_channels[j])
        delays.append({
            'mic_pair': (i, j),
            'delay': delay,
            'distance_diff': delay * 340 # скорость звука
        })

# Решение системы уравнений для определения координат
# (упрощенный алгоритм для 2D случая)
return solve_tdoa_equations(delays, mic_positions)

```

Задание 3: Фильтрация помех и выделение полезного сигнала

Адаптивная фильтрация:

```

from scipy.signal import wiener

def adaptive_noise_reduction(signal, noise_profile):
    """Адаптивное подавление шума"""

    # Винеровская фильтрация
    filtered_signal = wiener(signal, noise_profile)

    # Спектральное вычитание
    signal_spectrum = np.fft.rfft(signal)
    noise_spectrum = np.fft.rfft(noise_profile)

    # Оценка соотношения сигнал/шум
    snr_estimate = np.abs(signal_spectrum) /
    np.abs(noise_spectrum)

    # Применение спектральной маски
    mask = np.maximum(snr_estimate - 1, 0.1 * snr_estimate)
    clean_spectrum = signal_spectrum * mask

    clean_signal = np.fft.irfft(clean_spectrum, len(signal))

    return clean_signal

```

Контрольные вопросы по теме 3

1. Какие спектральные диапазоны используются для оптического обнаружения?
2. Что такое NETD и почему этот параметр важен для тепловизоров?
3. Как рассчитать дальность оптического обнаружения?
4. Какие алгоритмы используются для детекции движения на видео?
5. От чего зависит акустическая сигнатура мультикоптера?
6. Как работает система звуковой локации TDOA?
7. Какие ограничения имеют акустические методы обнаружения?
8. Как осуществляется комплексирование оптических и тепловизионных данных?

ТЕМА 4. СИСТЕМЫ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

Лекция 4.1: Правовые основы противодействия БАС

4.1.1. Нормативно-правовая база

Основные федеральные законы и нормативные акты:

1. Воздушный кодекс Российской Федерации (ст. 32.1, 33.1, 34)
2. Федеральные правила использования воздушного пространства РФ
3. Постановление Правительства РФ № 658 от 25.05.2019
4. Приказ Минтранса № 128 от 31.03.2020

Таблица 10

Зоны ограничений полетов БАС

Тип зоны	Радиус ограничения	Высота	Основание
Аэропорт	10 км	Полный запрет	ВК РФ
Атомный объект	3 км	150 м	Росатом
Военный объект	5 км	100 м	Минобороны
Особо важный объект	2 км	100 м	ФСО
Массовое мероприятие	1 км	50 м	Временные НПА

4.1.2. Полномочия и ответственность

Субъекты, имеющие право применения систем противодействия:

1. **Федеральные органы исполнительной власти**
2. **Органы госвласти субъектов РФ** (в рамках переданных полномочий)
3. **Частные охранные организации** (при наличии лицензии)
4. **Собственники объектов** (в рамках самообороны)

Административная и уголовная ответственность описана в таблице 11.

Таблица 11

Ответственность за нарушения

Нарушение	Административная	Уголовная
Полет в запретной зоне	Штраф 2-5 тыс. руб.	До 2 лет лишения свободы

Нарушение	Административная	Уголовная
Создание угрозы безопасности	Штраф 100-300 тыс. руб.	До 5 лет лишения свободы
Незаконное применение РЭБ	Штраф 800 тыс. - 1 млн руб.	До 7 лет лишения свободы

Окончание табл. 11

Лекция 4.2: Радиоэлектронное подавление

4.2.1. Принципы радиоэлектронной борьбы

Радиоэлектронное подавление (РЭП) - воздействие на радиоэлектронные средства БАС с целью нарушения их нормального функционирования.

Виды радиоэлектронного воздействия:

1. Активные помехи:

- Заградительные (по всей полосе частот)
- Прицельные (на конкретной частоте)
- Имитационные (ложные сигналы)

2. Пассивные помехи:

- Отражающие экраны
- Дипольные отражатели
- Аэрозольные завесы

4.2.2. Системы радиоподавления

Параметры эффективности джаммера:

Коэффициент подавления:

$$K_{\Pi} = P_{\text{пом}} / P_{\text{сиг}} \times G_{\Pi} / G_c$$

где:

- $P_{\text{пом}}$ - мощность помехи
- $P_{\text{сиг}}$ - мощность подавляемого сигнала
- G_{Π} - коэффициент усиления антенны постановщика помех
- G_c - коэффициент усиления антенны подавляемой системы

Дальность эффективного подавления:

$$R_{\Pi} = \sqrt{(P_{\text{пом}} \times G_{\Pi} \times \lambda^2) / (16\pi^2 \times P_{\text{мин}})}.$$

Таблица 12

Характеристики современных джаммеров

Модель	Частотный диапазон	Мощность	Радиус действия	Тип
DroneGun Tactical	2,4/5,8 ГГц	25 Вт	1 км	Направленный
Blighter Anti-UAV	2,4/5,8 ГГц	50 Вт	2 км	Секторный
Rafael Drone Dome	Широкий спектр	100 Вт	3,5 км	Комплексный

4.2.3. GPS-споффинг

Принцип GPS-споффинга:

Передача ложных GPS-сигналов для введения навигационной системы БАС в заблуждение.

Структура ложного GPS-сигнала:

- Корректный формат навигационного сообщения
- Ложные координаты спутников
- Ложные временные метки
- Правильные контрольные суммы

Сценарии применения:

- Принудительная посадка в заданной точке
- Увод БАС от защищаемого объекта
- Нарушение выполнения автономного полета.

Лекция 4.3: Системы перехвата управления

4.3.1. Методы перехвата управления

Перехват управления - получение контроля над БАС путем эмуляции или замещения сигналов управления.

1. Анализ и воспроизведение протокола:

- Перехват сигналов управления
- Расшифровка протокола связи
- Генерация собственных команд

2. Эксплуатация уязвимостей ПО:

- Использование незащищенных каналов связи
- Атаки на протоколы WiFi

- Взлом систем телеметрии

3. Аппаратный перехват:

- Подмена MAC-адресов
- Клонирование передатчиков
- Усиление собственного сигнала

4.3.2. Системы принудительной посадки

Протоколы принудительной посадки представлены в таблице 4.4.

Таблица 13

Команды принудительной посадки различных протоколов

Протокол	Команда посадки	Формат	Эффект
MAVLink	COMMAND_LONG(21)	Стандартный пакет	Автоматическая посадка
DJI	0x0A, 0x0B	Проприетарный	Return to Home
ArduPilot	LAND mode	Mode change	Вертикальная посадка
Betaflight	\$ LND	MSP команда	Отключение двигателей

4.3.3. Средства физического перехвата

Системы захвата БАС:

1. Паутинные системы:

- Выстреливание сети из пневматической пушки
- Дальность захвата: до 100 м
- Размер сети: 3×3 м или 6×6 м

2. Дрон-перехватчик:

- Специализированный БАС с сетью
- Автоматическое наведение на цель
- Захват и принудительная посадка

3. Лазерные системы:

- Повреждение оптических систем БАС
- Нагрев критических компонентов
- Требуют высокой точности наведения.

Практические занятия по теме 4

Практическое занятие 4.1: Изучение систем РЭБ

Цель занятия: Изучить принципы работы и методы применения систем радиоэлектронного подавления.

Задание 1: Анализ эффективности подавления

Исходные условия:

- Мультикоптер с системой управления на 2.4 ГГц
- Портативный джаммер мощностью 10 Вт
- Открытая местность

Экспериментальная процедура:

1. Измерение параметров сигнала управления:

```
# Измерение без помех
clean_signal_power = measure_signal_power(frequency=2.4e9)
clean_snr = calculate_snr(clean_signal_power, noise_floor)
print(f"Мощность сигнала без помех: {clean_signal_power:.1f} dBm")
print(f"SNR без помех: {clean_snr:.1f} dB")
```

2. Включение джаммера и измерение деградации:

```
# Измерение с помехами
jammed_signal_power = measure_signal_power(frequency=2.4e9)
jammed_snr = calculate_snr(jammed_signal_power, jamming_power)
suppression_ratio = clean_snr - jammed_snr
print(f"Коэффициент подавления: {suppression_ratio:.1f} dB")
```

3. Определение радиуса эффективного подавления:

- Измерения на различных дистанциях
- Построение зависимости качества связи от расстояния
- Определение границы устойчивого подавления

Задание 2: Тестирование GPS-споффера (2 часа)

ВАЖНО: Испытания проводятся в экранированной камере или с согласованием Роскомнадзора!

Принцип работы GPS-споффера:

1. Генерация ложного GPS-сигнала:

```
import numpy as np

def generate_gps_signal(false_coordinates, sat_positions):
    """Генерация ложного GPS сигнала"""

    # Расчет ложных псевдодальностей
    false_ranges = []
    for sat_pos in sat_positions:
```

```

        distance = np.linalg.norm(np.array(false_coordinates)
- np.array(sat_pos))
        false_ranges.append(distance + np.random.normal(0, 3))
# Добавление шума

        # Формирование навигационного сообщения
        nav_message = encode_navigation_data(false_coordinates,
false_ranges)

        # Генерация RF сигнала L1 (1575.42 МГц)
        rf_signal = modulate_bpsk(nav_message,
carrier_freq=1575.42e6)

    return rf_signal

```

2. Постепенный увод БАС:

- Начальные координаты близки к реальным
- Постепенное смещение к целевой точке
- Контроль реакции БАС

Задание 3: Комплексное применение средств РЭБ

Сценарий: Нейтрализация БАС, нарушившего границы закрытой зоны

Последовательность действий:

1. Фаза обнаружения:

- Активация систем мониторинга
- Классификация нарушителя
- Оценка уровня угрозы

2. Фаза предупреждения:

- Передача предупредительных сообщений
- Попытка установления связи с оператором
- Документирование нарушения

3. Фаза принуждения:

- Активация средств РЭП
- GPS-споффинг для увода
- При неэффективности - физическое воздействие

Практическое занятие 4.2: Документирование применения систем противодействия

Цель занятия: Изучить требования к документированию применения систем противодействия БАС.

Задание 1: Составление протокола обнаружения нарушения

Обязательные элементы протокола:

1. **Фиксация факта нарушения:**
 - Дата и точное время обнаружения
 - Координаты обнаружения
 - Характеристики нарушителя
 - Система, зафиксировавшая нарушение
2. **Действия оператора:**
 - Попытки установления связи
 - Применение предупредительных мер
 - Активация средств противодействия
 - Результат воздействия

Образец записи в журнале:

ПРОТОКОЛ № 2025-045

Дата: 15.11.2025 Время: 14:23:15 UTC+3

ОБНАРУЖЕНИЕ:

- Система: РЛС "Барьер-М", пост № 2
- Координаты: 55°47'23.5"N 48°44'18.7"E
- Высота: 85 м
- Направление движения: 045°, скорость 8 м/с

КЛАССИФИКАЦИЯ:

- Тип: мультироторная БАС
- Размер: средний (предположительно квадрокоптер)
- РЧ-сигнатура: обнаружен канал управления 2.437 ГГц

ДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА:

- 14:23:25 - Активирована система оповещения
- 14:23:45 - Включен джаммер направленного действия
- 14:24:15 - Зафиксирована потеря управления БАС
- 14:24:32 - БАС совершил аварийную посадку
- 14:25:00 - Место падения координировано службе безопасности

ОПЕРАТОР: Иванов И.И. (подпись)

РУКОВОДИТЕЛЬ СМЕНЫ: Петров П.П. (подпись)

Задание 2: Оформление актов применения технических средств (2 часа)

Структура акта применения РЭБ:

1. Правовые основания применения
2. Техническая характеристика примененных средств
3. Параметры воздействия
4. Результат применения
5. Побочные эффекты и ущерб

Задание 3: Взаимодействие с правоохранительными органами

На рисунке 2 представлен алгоритм передачи информации о нарушениях при взаимодействии с правоохранительными органами.



Рис. 2 - Алгоритм передачи информации

Задание 4: Анализ инцидентов и составление отчетов

Статистический анализ:

- Количество нарушений по типам
- Эффективность различных методов противодействия
- Временная и географическая статистика
- Рекомендации по совершенствованию системы

Практическое занятие 4.3: Комплексное применение систем

Цель занятия: Отработать навыки комплексного применения различных систем обнаружения и противодействия.

Сценарий учений: Защита массового мероприятия от воздушных угроз

Задание 1: Развёртывание системы защиты

Этапы развертывания:

1. Рекогносцировка местности:

- Анализ рельефа и застройки
- Определение возможных маршрутов БАС

- Выявление зон радиотени
2. **Размещение датчиков:**
- РЛС - на возвышенных точках
 - РЧ-мониторы - равномерно по периметру
 - Оптические системы - в ключевых направлениях
 - Средства противодействия - в центральных точках
3. **Развёртывание центра управления:**
- Установка рабочих мест операторов
 - Настройка систем связи
 - Проверка каналов взаимодействия

Задание 2: Отработка типовых сценариев

Сценарий 1: Одиночное нарушение

- Обнаружение БАС на дальности 2 км
- Классификация цели
- Принятие решения о противодействии
- Применение соответствующих мер

Сценарий 2: Групповое нарушение

- Одновременное появление нескольких БАС
- Приоритизация целей
- Координированное применение средств РЭБ
- Контроль эффективности

Сценарий 3: Скрытое нарушение

- БАС с отключенными передатчиками
- Обнаружение только пассивными средствами
- Применение активных мер поиска
- Физическое противодействие

Задание 3: Анализ эффективности и составление рекомендаций

Параметры оценки эффективности:

```
def calculate_system_effectiveness(detections,
neutralizations, false_alarms):
    """Расчет показателей эффективности системы"""

    # Вероятность обнаружения
    pd = len(detections) / total_targets if total_targets > 0
    else 0

    # Вероятность ложной тревоги
```

```
pfa = false_alarms / total_decisions if total_decisions >
0 else 0

# Эффективность нейтрализации
neutralization_rate = len(neutralizations) /
len(detections) if detections else 0

# Время реакции системы
average_response_time = np.mean([n.response_time for n in
neutralizations])

return {
    'detection_probability': pd,
    'false_alarm_rate': pfa,
    'neutralization_rate': neutralization_rate,
    'response_time': average_response_time
}
```

Итоговая оценка готовности системы защиты к реальному применению.

Контрольные вопросы по теме 4

1. Какие нормативные акты регулируют применение систем противодействия БАС?
2. Кто имеет право применять технические средства противодействия БАС?
3. Как рассчитывается эффективность радиоэлектронного подавления?
4. Что такое GPS-споффинг и как он применяется?
5. Какие методы перехвата управления существуют?
6. Какая ответственность предусмотрена за незаконное применение РЭБ?
7. Как документируется применение средств противодействия?
8. Какие параметры учитываются при оценке эффективности системы защиты?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие представляет собой комплексный курс подготовки операторов систем обнаружения и противодействия мультироторным беспилотным авиационным системам, охватывающий все ключевые аспекты профессиональной деятельности - от фундаментальных физических принципов обнаружения до тактики применения интегрированных комплексов защиты воздушного пространства.

Программа курса построена по принципу последовательного углубления знаний: от изучения теоретических основ работы различных типов датчиков и физики обнаружения малоразмерных воздушных целей к практическому освоению навыков эксплуатации современных технических систем, от базовых процедур обнаружения и классификации к сложным сценариям комплексного применения средств противодействия. Особое внимание уделено правовым аспектам применения систем обнаружения и противодействия, что критически важно для обеспечения легитимности действий оператора и предотвращения превышения полномочий.

Практическая направленность курса обеспечивается большим объемом практических занятий (88 часов из 144 часов программы), включающих работу с реальными системами обнаружения различных типов - радиолокационными станциями, радиочастотными мониторами, оптико-электронными комплексами, акустическими датчиками. Студенты получают возможность работать с профессиональным контрольно-измерительным оборудованием, осваивают современное программное обеспечение для анализа сигналов, изучают методы интеграции разнородных систем в единый комплекс обнаружения.

Междисциплинарный подход к обучению позволяет сформировать у слушателей комплексное понимание всех аспектов противодействия воздушным угрозам от БАС - технических, тактических, правовых, организационных - что необходимо для успешной профессиональной деятельности в области обеспечения безопасности. Оператор систем обнаружения должен не только владеть навыками работы с оборудованием, но и понимать тактику применения БАС потенциальными нарушителями, особенности защиты различных типов объектов, принципы построения эшелонированной обороны воздушного пространства.

Системный подход к обучению предполагает освоение не только практических навыков выполнения конкретных операций, но и понимание теоретических основ, что позволяет операторам самостоятельно анализировать

нестандартные ситуации, принимать обоснованные решения при выборе методов противодействия, адаптировать процедуры защиты к изменяющимся условиям и новым типам угроз. Понимание физических ограничений различных методов обнаружения позволяет операторам правильно интерпретировать данные от датчиков и избегать ложных классификаций.

Особое значение придается культуре документирования всех случаев обнаружения и применения технических средств противодействия, что обеспечивает юридическую защищенность действий оператора, создает основу для анализа эффективности системы защиты, накопления статистики угроз, совершенствования процедур безопасности. Правильное ведение документации является не только административным требованием, но и важным элементом профессиональной культуры специалиста по безопасности.

Интеграция различных физических принципов обнаружения в комплексные системы представляет собой современный тренд развития технологий противодействия БАС. Операторы должны понимать принципы работы алгоритмов комплексирования данных от различных датчиков, методы повышения надежности обнаружения и снижения вероятности ложных тревог. Все большую роль играют системы искусственного интеллекта, автоматизирующие процессы обнаружения, классификации и принятия решений.

Постоянное развитие технологий беспилотных авиационных систем, появление новых типов БАС с улучшенными характеристиками скрытности, автономности, дальности полета требует от операторов систем обнаружения непрерывного профессионального развития. Данное пособие закладывает фундаментальные знания о физических принципах обнаружения и классификации воздушных целей, на основе которых специалисты смогут успешно адаптироваться к появлению новых угроз, осваивать новое оборудование и технологии противодействия.

Правовая грамотность операторов систем обнаружения приобретает особое значение в условиях развивающегося законодательного регулирования применения технических средств противодействия. Операторы должны четко понимать границы своих полномочий, процедуры применения различных мер противодействия, требования к документированию своих действий, что критически важно для предотвращения правовых проблем и обеспечения эффективной защиты объектов.

Тактическая подготовка операторов включает понимание принципов построения эшелонированной обороны воздушного пространства, методов

оптимального размещения датчиков с учетом особенностей местности и объекта защиты, алгоритмов координации с другими элементами системы безопасности. Оператор должен уметь анализировать тактику действий потенциальных нарушителей, прогнозировать их поведение, выбирать оптимальные контрмеры.

Выпускники данной программы подготовки становятся востребованными специалистами на рынке труда в области обеспечения безопасности. Они способны профессионально эксплуатировать современные системы обнаружения и противодействия БАС, обеспечивать надежную защиту критически важных объектов, массовых мероприятий и режимных территорий от воздушных угроз, создавать и оптимизировать комплексные системы защиты воздушного пространства.

Интеграция теоретических знаний с практическими навыками, освоение современных технологий обнаружения и противодействия, глубокое понимание правовых основ применения технических средств делают выпускников данной программы высококвалифицированными специалистами, способными решать сложные задачи обеспечения безопасности в условиях растущих угроз от беспилотных авиационных систем.

Авторы выражают надежду, что данное учебное пособие станет надежным помощником в освоении профессии оператора систем обнаружения БАС и будет способствовать формированию высококвалифицированных кадров для критически важной сферы обеспечения национальной безопасности и защиты от воздушных угроз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 N 60-ФЗ (действующая редакция). - Режим доступа:
http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/
2. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации (утв. Постановлением Правительства РФ от 11.03.2010 N 138). - Режим доступа:
<https://base.garant.ru/197839/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33>
3. Об утверждении Правил учета беспилотных гражданских воздушных судов (утв. Постановлением Правительства Рос. Федерации от 25.05.2019 г. № 658) - Режим доступа:
<http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201905290035>
4. *Верба В.С.* Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Принципы построения и особенности применения / В.С. Верба, Б.Г. Татарский. – М. : Радиотехника, 2016. – 680 с.
6. *Richards M.A.* Fundamentals of Radar Signal Processing / M.A. Richards. – N.Y. : McGraw-Hill, 2014. – 690 p.
7. *Skolnik M.* Introduction to Radar Systems / M. Skolnik. – 3rd ed. – N.Y. : McGraw-Hill, 2001. – 772 p.
8. *Mahafza B.R.* Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB / B.R. Mahafza. – Boca Raton : CRC Press, 2016. – 671 p.
9. *Gonzalez R.C.* Digital Image Processing / R.C. Gonzalez, R.E. Woods. – 4th ed. – L. : Pearson, 2018. – 1192 p.
10. *Haykin S.* Adaptive Filters Theory / S. Haykin. – 5th ed. – L. : Pearson, 2013. – 896 p.
11. ГОСТ Р 58880-2020. Системы беспилотные авиационные. Общие требования. – Введ. 2020-12-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – IV, 20 с.
12. ГОСТ Р 58828-2020. Беспилотные авиационные системы. Термины и определения. – Введ. 2020-10-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – IV, 12 с.
13. RTCA DO-365 "Minimum Requirements for Unmanned Aircraft Systems"
14. STANAG 4671 "Unmanned Aircraft Systems Airworthiness Requirements"
15. Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация) [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – URL: <https://favr.gov.ru/>

16. Государственная корпорация по организации воздушного движения [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – URL: <https://gkovd.ru/> (дата обращения: 16.12.2024).

17. Единая система организации воздушного движения [Электронный ресурс] : офиц. сайт. – URL: <https://zevs.favt.ru/> (дата обращения: 16.12.2024).

15. Международная организация гражданской авиации:
<https://icao.int/>

Об авторах:

Кокунин Петр Анатольевич – директор Центра превосходства «НИЦ «Специальная робототехника и искусственный интеллект» Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, кандидат технических наук, доцент, специалист в области беспилотных авиационных систем и робототехники.

Чикрин Дмитрий Евгеньевич – директор Института искусственного интеллекта робототехники и системной инженерии КФУ, доктор технических наук, профессор кафедры анализа данных и технологий программирования Института вычислительной математики и информационных технологий, КФУ, специалист в области системного анализа, информационных технологий, систем управления и искусственного интеллекта.

Шиндор Ольга Владимировна – заместитель директора по научной работе Института искусственного интеллекта, робототехники и системной инженерии КФУ, кандидат технических наук, специалист в области информационных технологий и систем управления.

Егорчев Антон Александрович – директор Института вычислительной математики и информационных технологий КФУ, кандидат технических наук, доцент, специалист в информационных технологиях, систем виртуального моделирования.

*Электронное учебное издание
сетевого распространения*

**Кокунин Петр Анатольевич
Чикрин Дмитрий Евгеньевич
Шиндор Ольга Владимировна
Егорчев Антон Александрович**

**ОПЕРАТОР СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ МУЛЬТИРОТОРНЫХ
БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Учебное пособие

Корректор Н.М. Корюков

Компьютерная верстка М.А. Ахметова

Дизайн обложки М.А. Ахметова

Подписано к использованию 21.11.2025

Гарнитура «Times New Roman»

Издательства Казанского университета
420008, г. Казань, ул. Профессора Нужина, 1/37
тел. (843) 233-73-59, 233-73-28