

An aerial photograph showing a multi-lane highway interchange. The highway runs vertically through the center of the image. To the left and right of the highway are large green fields. In the background, there are industrial zones with various buildings and structures. The sky is clear and blue.

Лэй Энстазия

**Проект «Слышь»: акустическая система
по противодействию беспилотным
летательным аппаратам (БПЛА)**

Лэй Энстазия

Проект «Слышь»: акустическая система по противодействию беспилотным летательным аппаратам (БПЛА)

<https://litres.ru/74384478>

SelfPub; 2026

Аннотация

Книга представляет системное описание инновационного проекта «Слышь» — распределённой акустической сети для обнаружения, классификации и нейтрализации БПЛА. В основе — использование линий электропередач как инфраструктурной платформы (питание, синхронизация, связь). Система объединяет многоканальные микрофонные массивы, DSP-обработку, нейросетевую классификацию (EfficientNetB0), TDO-апеленгацию с ошибкой менее 3 градусов и активное акустическое поражение MEMS-гироскопов. Пассивность, всепогодность, экономичность и масштабируемость позволяют создавать непрерывные «акустические периметры» вдоль ЛЭП, защищая объекты от одиночных и роевых атак. Время реакции — менее 2,5 с, вероятность обнаружения — 95 процентов. Издание содержит полную архитектуру, технические спецификации,

сценарии применения, методики испытаний и экономическое обоснование. Для инженеров, разработчиков систем ПВО и специалистов по противодронной обороне.

Содержание

Введение	5
Глава 1. Угроза беспилотных летательных аппаратов	13
Глава 2. Концепция системы «Слышь»	21
Глава 3. Общая архитектура системы	31
Глава 4. Аппаратный уровень (уровень 1)	45
Глава 5. Уровень цифровой обработки сигналов (DSP, уровень 2)	56
Конец ознакомительного фрагмента.	59

Лэй Энстазия Проект «Слышь»: акустическая система по противодействию беспилотным летательным аппаратам (БПЛА)

Введение

Актуальность задачи противодействия БПЛА

Стремительное развитие и демократизация беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стали одним из самых значительных вызовов для систем безопасности XXI века. Некогда дорогостоящая и сложная военная технология сегодня доступна каждому: коммерческие дроны можно приобрести в любом магазине электроники, а тактические ударные БПЛА всё чаще применяются в вооружённых конфликтах. Эта доступность породила принципиально новую угрозу, против которой традиционные системы противовоздушной обороны (ПВО) оказались бессильны.

Проблема усугубляется тем, что современный БПЛА может быть запущен из любого места — с городской крыши, из багажника автомобиля, из лесного массива или с поля. Он не требует взлётно-посадочной полосы, может лететь на малых высотах, огибая рельеф, и оставаться невидимым для радиолокационных станций на фоне городской застройки или пересечённой местности. Массовость и скрытность применения дронов делают их идеальным инструментом как для террористических атак на критическую инфраструктуру, так и для разведывательно-ударных операций в зонах боевых действий.

Особую тревогу вызывают роевые атаки, когда множество малых БПЛА одновременно устремляются к цели, перегружая системы ПВО и делая традиционную кинетическую оборону экономически неэффективной: стоимость зенитной ракеты многократно превышает стоимость сбиваемого дрона. Против такой угрозы необходимы принципиально новые подходы — дешёвые, распределённые, способные работать в любое время суток и в любую погоду, незаметные для противника и не создающие помех гражданской инфраструктуре.

Проблема обнаружения в городской и пересечённой местности

Традиционные средства обнаружения воздушных целей — радиолокационные станции — имеют фундаментальные ограничения в городской среде. Многоэтажная застройка со-

здаёт множество отражений и «мёртвых зон»; малоразмерные дроны на малых высотах просто теряются на фоне зданий и земли. Оптические и тепловизионные системы зависят от погодных условий — туман, дождь, снег или ночное время серьёзно ограничивают их эффективность. Акустические же системы обнаружения лишены этих недостатков: звук распространяется во все стороны, не зависит от освещённости и проникает за препятствия.

Однако классические акустические системы, использующие один или два микрофона, не способны обеспечить ни достаточной дальности обнаружения, ни приемлемой точности определения координат цели. Шум города, ветер, эхо и реверберация от зданий маскируют слабый сигнал от приближающегося дрона. Одиночный датчик не может определить ни направление на источник звука, ни расстояние до него.

Именно эти ограничения и призван преодолеть проект «Слышь».

Концепция проекта «Слышь»: использование линий электропередач как инфраструктурной основы

Ключевая идея проекта «Слышь» заключается в создании распределённой акустической сети, способной обнаруживать, классифицировать и пеленговать БПЛА в реальном времени. В качестве инфраструктурной основы для развёртывания этой сети выбраны линии электропередач (ЛЭП) — и это решение даёт сразу несколько стратегических преимуществ.

ществ.

Во-первых, ЛЭП покрывают огромные территории, включая труднодоступные районы, и проходят вдоль охраняемых объектов — энергостанций, подстанций, промышленных предприятий. Установка акустических систем на опорах ЛЭП позволяет создать непрерывный «акустический периметр» без необходимости прокладки дополнительных кабелей или строительства специальных вышек.

Во-вторых, линии электропередач обеспечивают питание акустических узлов по технологии PoE (Power over Ethernet). Это решает проблему энергоснабжения распределённых датчиков — каждый узел получает питание от существующей сети, что исключает необходимость в автономных батареях или солнечных панелях и их регулярном обслуживании.

В-третьих, ЛЭП создают естественную проводную инфраструктуру для синхронизации времени между узлами. Точная временная синхронизация — критическое условие для метода TDOA (Time Difference of Arrival), позволяющего определять координаты источника звука по разнице времени прихода сигнала к разнесённым датчикам.

Наконец, узлы, установленные на опорах ЛЭП, автоматически объединяются в самоорганизующуюся Mesh-сеть (на базе протокола LoRa с маршрутизацией AODV). Это означает, что каждый узел является одновременно и датчиком, и ретранслятором: информация от удалённых узлов передаётся через соседние, обеспечивая доставку данных даже при

выходе из строя отдельных элементов сети.

Принцип «слышать — классифицировать — передавать — уничтожать»

Архитектура системы «Слышь» построена на принципе замкнутого цикла реального времени, который включает четыре ключевых этапа:

Слышать — акустический узел фиксирует звук с помощью массива из восьми высокочувствительных микрофонных капсул (MEMS-микрофоны ICS-43434 с цифровым интерфейсом I²S). Цифровой сигнал проходит через высокочастотный КИХ-фильтр, подавляющий ветровой шум и инфразвук, а затем преобразуется в спектрограмму с помощью оконного преобразования Фурье.

Классифицировать — нейросетевой классификатор на базе архитектуры EfficientNet-B0 с 5,3 млн параметров определяет тип БПЛА, состояние двигателя (набор высоты, крейсерский полёт, снижение) и проверяет сигнал на «живость», отсеивая атаки воспроизведения. Время инференса — менее 50 мс на бортовом NPU.

Передать — информация о цели (эмбединги, временные метки) передаётся по Mesh-сети на шлюз, где выполняется TDOA-триангуляция. Ошибка пеленгации составляет менее 3°, а полное время от момента прихода звука до выдачи тактической метки — не более 2,5 секунд. Данные передаются в системы ПВО и РЭБ по стандартизированным протоколам.

Уничтожить — на основе полученных координат и клас-

сификации мобильная огневая группа (пикап, оснащённый тепловизионной системой, РЭБ-станцией, автоматической пулемётной турелью и дронами-перехватчиками) выдвигается в зону перехвата и нейтрализует угрозу. Для особо важных объектов система также может быть дополнена стационарным модулем активного акустического поражения, воздействующего на MEMS-гироскопы БПЛА резонансными частотами.

Краткий обзор архитектуры и ключевые достижения

Архитектура системы «Слышь» включает восемь функциональных уровней:

Уровень 1 (Аппаратный) — микрофонный массив (8 капсул), АЦП 24 бит/48 кГц, GPS-приёмник ZED-F9P (точность синхронизации 30 нс), Edge-компьютер NXP i.MX 8M Plus.

Уровень 2 (DSP) — КИХ-фильтр высоких частот (срез 200 Гц, порядок 1740), STFT-преобразование (окно 2048, перекрытие 75%), вычисление SPL с адаптивным порогом (фон + 15 дБ).

Уровень 3 (Интеллектуальный) — нейросетевая классификация (EfficientNet-B0, 5,8 млн параметров), детектор анти-фальсификации, адаптивная модель few-shot для добавления новых типов дронов по 10–15 примерам.

Уровень 4 (Сетевой) — синхронизация времени (PTP + GPS PPS, точность < 1 мкс), Mesh-сеть LoRa + AODV, TDOA-триангуляция с ошибкой пеленга < 3°.

Уровень 5 (Тактический) — генерация стандартизированных меток (JSON/Protobuf), интеграция с единой информационной системой ПВО, интерфейс оператора с тепловой картой угроз.

Уровень 6 (Активное противодействие) — фазированная решётка пьезоэлементов (64 элемента, SPL 150 дБ, частота 20–40 кГц) для резонансного поражения MEMS-гироскопов.

Уровень 7 (Инженерный) — режим «Тишина» при потере связи, энергопотребление менее 15 Вт, всепогодное исполнение IP67, рабочий диапазон $-40^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$.

Уровень 8 (Критерии эффективности) — вероятность правильного обнаружения Pd 0,95 на дистанции до 1,5 км, частота ложных тревог FAR 1 срабатывание в час на узел, время реакции 2,5 с.

Ключевые достижения проекта «Слышь» включают:

Пассивность — система не излучает и не демаскирует себя, в отличие от радаров.

Всепогодность — работа в любое время суток, при тумане, дожде и снеге.

Высокая точность — ошибка пеленгации менее 3° , дальность обнаружения до 1,5 км.

Низкая стоимость — цена одного акустического узла в серийном производстве составляет от 30 до 70 тысяч рублей.

Масштабируемость — использование существующей инфраструктуры ЛЭП и самоорганизующейся Mesh-сети поз-

воляет покрывать огромные территории без прокладки новых коммуникаций.

Проект «Слышь» предлагает системное решение проблемы противодействия БПЛА, превращая протяжённые линии электропередач в «акустический радар», способный защитить критическую инфраструктуру, военные объекты и мирное население от растущей угрозы беспилотных атак.

Глава 1. Угроза беспилотных летательных аппаратов

1.1. Классификация БПЛА по типу, массе, двигателям и акустической сигнатуре

Современные беспилотные летательные аппараты представляют собой чрезвычайно разнообразный класс объектов, различающихся по назначению, конструкции, массе, типу двигателя и, что критически важно для акустического обнаружения, — по своей звуковой сигнатуре. Для эффективно-го противодействия необходимо понимать это разнообразие и уметь классифицировать цели в реальном времени.

По массе и размеру БПЛА принято разделять на несколько категорий. Микро- и мини-дроны (массой до 5 кг) — это наиболее массовый класс, включающий коммерческие квадрокоптеры, FPV-дроны и тактические разведывательные аппараты. Средние БПЛА (5–25 кг) — класс, используемые как для разведки, так и для ударных задач. Тяжёлые БПЛА (свыше 25 кг) — это, как правило, ударные беспилотники в том числе самолетного и вертолётного типа, способные нести значительную боевую нагрузку.

По типу двигателя выделяются:

Электрические — наиболее распространённый класс, использующий электродвигатели с воздушными винтами.

Именно эти аппараты создают характерный высокочастотный шум, спектр которого определяется первыми десятью гармониками шума двигателя и первыми пятью гармониками шума вращения винта.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) — характерны для тяжёлых БПЛА, создают низкочастотный шум с ярко выраженными гармониками.

Малоразмерные турбореактивные двигатели (МРТД) — устанавливаются на тяжёлых и скоростных ударных БПЛА.

По акустической сигнатуре каждый тип БПЛА имеет свой уникальный «голос». Уровень шума коммерческих дронов регламентируется европейскими нормами и составляет 83–85 дБ, однако тактические аппараты могут иметь более высокий или, напротив, специально сниженный уровень шума. Для акустической идентификации критически важны не только общий уровень звукового давления, но и спектральный состав сигнала: частоты вращения винтов, их гармоники, модуляционные эффекты. Нейросетевая система классификации проекта «Слышь» выделяет множество классов, а также определяет состояние двигателя — набор высоты, крейсерский полёт или снижение — по характерному изменению тона (эффект Доплера).

1.2. Тактика применения: одиночные и роевые атаки, маловысотный полёт, скрытность

Эволюция тактики применения БПЛА представляет собой одну из самых быстро меняющихся областей современ-

ного военного искусства. Противник постоянно адаптируется, находя новые способы преодоления систем ПВО.

Маловысотный и сверхмаловысотный полёт стал основным способом уклонения от радиолокационного обнаружения. Некоторые типы БПЛА снижаются до высот 20–50 метров, а в отдельных случаях — до 5–22 метров. Они используют огибание рельефа местности, скрываясь за зданиями, деревьями и холмами. В городской среде дроны летят на уровне многоэтажек, что делает их практически невидимыми для классических радиолокационных станций. Всё чаще применяется ручное управление на сверхмалых высотах, когда оператор визуально ведёт аппарат, огибая препятствия и используя естественные укрытия.

Роевые атаки представляют собой ещё более сложный вызов. Тактика «москитного роя» предполагает одновременный запуск большого количества дронов в расчёте на то, что хотя бы часть из них прорвётся к цели. При этом дроны могут разделяться: один заходит с тыла, другой атакует с фронта, блокируя манёвр обороняющихся. Рой перегружает системы ПВО, создавая множество целей одновременно, что делает традиционную кинетическую оборону экономически неэффективной: стоимость сбиваемой ракеты многократно превышает стоимость уничтожаемого дрона.

Скрытность обеспечивается не только малой высотой, но и использованием радиопрозрачных материалов (пластик, композиты), которые делают дроны малозаметными для ра-

даров. Противник активно использует особенности местности и городской застройки для маскировки маршрутов полёта.

1.3. Уязвимости современных дронов: акустические, радиоэлектронные и кинетические

Несмотря на всю сложность обнаружения, современные БПЛА обладают рядом фундаментальных уязвимостей, которые могут быть использованы для их нейтрализации.

Акустические уязвимости являются одними из наиболее перспективных для атаки. MEMS-гироскопы и акселерометры, обеспечивающие стабилизацию полёта, представляют собой механические резонансные структуры типа «пружина-масса-демпфер». При воздействии акустической волны на резонансной частоте возникает рост амплитуды колебаний, приводящий к сбою или разрушению чувствительного элемента. Резонансные частоты MEMS-гироскопов лежат в диапазоне от 2 до 40 кГц, причём большинство имеют резонанс в ультразвуковом диапазоне (> 20 кГц). Винты и корпус дрона также могут становиться «ведомыми осцилляторами», передавая вибрации на инерциальный измерительный модуль. Исследования показывают, что акустическая интерференция может вызывать отклонение гироскопа по рысканью до 122° за 10 минут.

Радиоэлектронные уязвимости связаны с каналами управления и навигации. Радиоподавление (RF-джемминг) может прервать связь между дроном и оператором, вызывая па-

дение или вынужденную посадку. GNSS-спуфинг и глушение нарушают навигацию, дезориентируя аппарат. Важно отметить, что многие современные дроны используют уязвимое аппаратное обеспечение — пропеллеры, MEMS-датчики, RF-каналы — и хрупкое программное обеспечение, что делает их подверженными некинетическим методам противодействия.

Кинетические уязвимости — это физическое разрушение или повреждение дрона. Однако кинетические методы сопряжены с риском сопутствующего ущерба и высокой стоимостью каждого выстрела.

1.4. Анализ существующих систем ПВО и их ограничения в борьбе с малыми БПЛА

Традиционные системы противовоздушной обороны, созданные для борьбы с пилотируемой авиацией и баллистическими ракетами, оказались плохо приспособлены к угрозе малых БПЛА. Это не технический сбой, а фундаментальное несоответствие архитектуры.

Радиолокационные станции имеют серьёзные ограничения. Малые БПЛА относятся к классу «низколетящих, малозаметных и медленных» целей («low-slow-small»). Их радиолокационная сигнатура крайне слаба и легко маскируется помехами от земли, зданий и птиц. Дроны, изготовленные из радиопрозрачных материалов, таких как пластик, практически невидимы для радаров. Система Arena-M, например, с трудом адаптируется для перехвата FPV-дронов именно из-

за ограничений своей радарной технологии.

Существующие зенитные комплексы («Панцирь-С1», «Тор-М2», «Бук-М3») являются дорогостоящими в эксплуатации и обслуживании. Их применение против роя дешёвых дронов экономически нецелесообразно. Кроме того, они не предназначены для работы по столь малым и маневренным целям на сверхмалых высотах.

Оптические и тепловизионные системы зависят от погодных условий и времени суток — туман, дождь, снег и ночь серьёзно ограничивают их эффективность.

Таким образом, существующие системы ПВО оставляют значительные «мёртвые зоны» на малых высотах, которые активно эксплуатируются противником.

1.5. Обоснование необходимости пассивных акустических систем раннего обнаружения

Именно в этом контексте пассивные акустические системы обнаружения приобретают решающее значение. В сценариях, где оптические и радиолокационные системы ограничены или непрактичны, пассивное акустическое зондирование представляет собой надёжную альтернативу для обнаружения и локализации БПЛА.

Пассивность — ключевое преимущество. В отличие от радаров, акустическая система не излучает никаких сигналов, которые могли бы быть обнаружены средствами радиоэлектронной разведки противника. Она неуязвима для средств РЭБ, направленных на подавление активных сенсоров.

Всепогодность и круглосуточность — акустические датчики работают в любую погоду, при тумане, дожде и снеге, в любое время суток. Звук распространяется во все стороны, огибая препятствия, и не зависит от освещённости.

Экономическая эффективность — пассивные акустические системы с использованием MEMS-микрофонных массивов и машинного обучения предлагают безопасный и экономически выгодный способ повышения ситуационной осведомлённости на аэродромах, массовых мероприятиях и объектах критической инфраструктуры. Стоимость одного акустического узла в серийном производстве составляет от 30 до 70 тысяч рублей, что на порядки дешевле зенитных ракетных комплексов.

Способность к классификации — современные системы на основе нейросетей способны не просто обнаружить объект, но и идентифицировать его тип, а иногда и конкретную модель — у каждого дрона свой «голос». Анализ спектра звука позволяет выделить характерные признаки и сравнить их с базой акустических сигнатур.

Интеграция в распределённые сети — установка акустических датчиков на опорах линий электропередач позволяет создать непрерывный «акустический периметр» на огромных территориях, обеспечивая раннее обнаружение БПЛА на дальних подступах к охраняемым объектам.

Именно эти преимущества и легли в основу проекта «Слышь» — системы, которая превращает протяжённые ли-

нии электропередач в интеллектуальную акустическую сеть, способную слышать, классифицировать и передавать информацию о воздушной угрозе в режиме реального времени.

Глава 2. Концепция системы «Слышь»

2.1. Использование ЛЭП как несущей инфраструктуры: энергопитание, связь, размещение

Выбор линий электропередач в качестве инфраструктурной основы для развёртывания акустической сети «Слышь» не является случайным — это стратегическое решение, определяющее все ключевые преимущества системы.

Энергетическая автономность. Каждый акустический узел получает питание по технологии Power over Ethernet (PoE) от существующих линий электропередач. В зависимости от режима работы энергопотребление узла варьируется: в дежурном режиме оно составляет 3–4 Вт, в активном — 10–12 Вт, при включении подогрева и сигнализации может достигать 21–26 Вт. Стандарт IEEE 802.3at (PoE+) обеспечивает до 30 Вт на порт, что полностью покрывает потребности узла даже в пиковых режимах. Это исключает необходимость прокладки отдельных силовых кабелей, установки солнечных панелей или регулярной замены аккумуляторов — критическое преимущество для систем, развёртываемых на больших территориях.

Проводная инфраструктура для синхронизации. ЛЭП обеспечивают естественную проводную среду для высоко-

точной синхронизации времени между узлами. Использование протокола PTP (IEEE 1588) по Ethernet-кабелям даёт точность синхронизации менее 1 микросекунды. В сочетании с GPS PPS-сигналом от модуля u-blox ZED-F9P (точность 30 нс) достигается гибридная синхронизация, необходимая для корректной TDOA-триангуляции. Ошибка синхронизации в 1 микросекунду даёт ошибку позиционирования около 0,34 метра — более чем достаточную для точного целеуказания.

Размещение на опорах. Опоры ЛЭП обеспечивают оптимальную высоту установки акустических датчиков (5–15 метров), что существенно расширяет зону обнаружения и уменьшает влияние наземных помех и ревербераций. Узлы монтируются на существующие конструкции, что исключает необходимость строительства специальных вышек. Корпус узла имеет класс защиты IP67 и рассчитан на работу в диапазоне температур от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$, что гарантирует всепогодную работу в любых климатических условиях.

Географический охват. Линии электропередач покрывают огромные территории, включая труднодоступные районы, и проходят вдоль охраняемых объектов — электростанций, подстанций, промышленных предприятий. Это позволяет создать непрерывный «акустический периметр» без дополнительных капитальных затрат на инфраструктуру.

2.2. Самоорганизующаяся Mesh-сеть: объединение узлов в единый информационный контур

Акустические узлы, установленные на опорах ЛЭП, автоматически объединяются в самоорганизующуюся Mesh-сеть, где каждый узел одновременно является и датчиком, и ретранслятором.

Физический уровень. В качестве основного канала связи выбран протокол LoRa с маршрутизацией AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector). Это решение обеспечивает дальность связи до 5 км в условиях прямой видимости и до 1 км в городской застройке. Энергопотребление радиомодуля в режиме передачи не превышает 100 мВт, что критически важно для узлов, работающих в автономном режиме. Важно подчеркнуть: в сеть передаются не сырые аудиопотоки (что потребовало бы мегабитных скоростей), а только сжатые эмбединги — векторы признаков, сформированные нейросетью на борту узла. После квантизации и сжатия размер пакета составляет около 200 байт, а трафик с одного узла — менее 2 Кбит/с. Это позволяет LoRa-сети с её ограниченной пропускной способностью (до 50 Кбит/с) эффективно обслуживать десятки узлов одновременно.

Маршрутизация и самоисцеление. Протокол AODV динамически обнаруживает маршруты при необходимости и автоматически перестраивает их при выходе узлов из строя. Сообщения работоспособности, отправляемые каждые 10 секунд, обеспечивают мониторинг состояния соседей. При пропадании работоспособности более 30 секунд узел считается недоступным, и маршруты перестраиваются за время

менее 5 секунд. Максимальное количество хопов (переприёмов) до шлюза составляет 3–5 при шаге сети 200–500 метров, что гарантирует доставку пакетов даже при отказе отдельных ретрансляторов.

Управление коллизиями. Для предотвращения коллизий при одновременной передаче используется CSMA/CA, а также приоритезация трафика: сообщения тревоги имеют высший приоритет. Регулярные сообщения (работоспособность, эмбединги) передаются по TDMA-подобному расписанию.

Таким образом, Mesh-сеть превращает множество отдельных акустических датчиков в единый распределённый инструмент наблюдения, устойчивый к отказам отдельных элементов и способный работать в условиях активного радиоэлектронного противодействия.

2.3. Эшелонированная оборона: дальний рубеж (акустика), средний (РЭБ), ближний (огонь)

Система «Слышь» реализует принцип эшелонированной обороны, при котором каждый рубеж решает свои специфические задачи, а отказ одного рубежа не приводит к катастрофическим последствиям.

Дальний рубеж (акустическое обнаружение). Первый эшелон выставляется на удалении 3 км от охраняемого объекта. Здесь акустические узлы обеспечивают раннее обнаружение БПЛА. Вероятность правильного обнаружения на дистанции до 1,5 км составляет не менее 0,95. На этом рубеже

система идентифицирует тип цели, определяет её координаты с ошибкой пеленгации менее 3° и передаёт информацию в центр управления. Время полного цикла от момента прихода звука до выдачи тактической метки не превышает 2,5 секунд. Дальний рубеж даёт операторам и мобильным группам до нескольких минут на принятие решения и выдвижение.

Средний рубеж (радиоэлектронная борьба). Второй эшелон, размещаемый на удалении 1–2 км от объекта, уточняет координаты и осуществляет сопровождение целей. На этом рубеже система автоматически формирует рекомендации для средств РЭБ: на основе идентифицированного типа БПЛА выбираются вероятные частоты управления и видеопередачи (например, для FPV — 915 МГц, 2,4 ГГц, 5,8 ГГц), рассчитывается рекомендуемая мощность подавления и тип помехи — заградительная или прицельная. РЭБ-воздействие может нарушить каналы управления и навигации, вынуждая дрон к посадке или возврату.

Ближний рубеж (кинетическое поражение). Третий эшелон — непосредственно на периметре охраняемого объекта (0–500 м). Здесь обеспечивается максимальная точность позиционирования и выдача целеуказания средствам поражения. Если РЭБ-подавление оказалось неэффективным, в дело вступает мобильная огневая группа с автоматической пулемётной турелью и дронами-перехватчиками. Этот рубеж — последняя линия обороны, гарантирующая нейтрализацию угрозы, прорвавшейся через первые два эшелона.

Такая трёхуровневая архитектура обеспечивает надёжную защиту даже при массированных атаках: отказ одного рубежа компенсируется следующими, а средства поражения применяются дифференцированно в зависимости от типа угрозы и дистанции.

2.4. Роль мобильной огневой группы (пикап): оснащение, задачи, взаимодействие

Мобильная огневая группа является ключевым элементом тактического контура системы «Слышь», обеспечивающим гибкое и быстрое реагирование на угрозы, которые не могут быть нейтрализованы стационарными средствами РЭБ или требуют кинетического поражения.

Состав и оснащение. Группа базируется на автомобиле повышенной проходимости (пикап), оснащённом модульным комплексом вооружения, включающим:

Тепловизионную систему обнаружения — для визуального захвата и подтверждения цели в любое время суток и при сложных погодных условиях.

Систему радиоэлектронной борьбы (РЭБ) — для подавления каналов управления и навигации БПЛА на средней дистанции.

Автоматическую пулемётную турель — для кинетического поражения целей, прорвавшихся на ближний рубеж.

Дроны-перехватчики — для точечной нейтрализации особо опасных или маневренных целей.

Получение целеуказания. Мобильная группа получает

данные от стационарной сети «Слышь» в стандартизированном формате тактической метки. Метка содержит: координаты цели (широта, долгота, высота), скорость и курс, тип БПЛА и уровень достоверности, уровень угрозы (Threat Level 0–5). Передача осуществляется по защищённым каналам связи с использованием протоколов MQTT или CoAP, а при интеграции с военными системами — через глобальную информационную систему.

Тактика выдвижения. Получив целеуказание, группа выдвигается в зону перехвата, занимая позицию с учётом прогнозируемой траектории цели. Время реакции — от момента получения координат до прибытия в зону — минимизируется за счёт предварительного патрулирования в зонах ответственности.

Координация средств поражения. В зависимости от типа цели и дистанции применяются различные средства: на дальних подступах — РЭБ-подавление и запуск дронов-перехватчиков; на ближней дистанции — автоматическая пулемётная турель. Важно отметить, что решение о применении кинетических средств принимается оператором, что исключает риск поражения своих объектов или гражданских лиц.

Таким образом, мобильная группа является «огневым кулаком» системы, способным оперативно реагировать на угрозы в любой точке охраняемого периметра.

2.5. Замкнутый цикл управления: обнаружение

классификация пеленгация целеуказание поражение оценка эффективности

Система «Слышь» реализует полностью замкнутый цикл управления в реальном времени, где каждый этап жёстко связан временными бюджетами и механизмами обратной связи.

Обнаружение (100 мс). Многоканальный аудиопоток с микрофонного массива (8 каналов, 24 бит, 48 кГц) проходит через КИХ-фильтр высоких частот (срез 200 Гц), подавляющий ветровой шум и инфразвук. Вычисляется уровень звукового давления (SPL) с постоянной времени интегрирования 100 мс, и при превышении адаптивного порога (фон + 15 дБ) формируется триггер для запуска нейросетевого классификатора.

Классификация (100 мс). Нейросеть на базе EfficientNet-V0 (5,3 млн параметров) определяет тип БПЛА (несколько классов), состояние двигателя (3 класса) и проверяет сигнал на «живость» (детектор анти-спуфинга). Результат передаётся в тактический уровень для выбора метода противодействия.

Пеленгация (300 мс). Временные метки прихода сигнала от как минимум 4 синхронизированных узлов обрабатываются алгоритмом GCC-RHAT для оценки TDOA-задержек. Система отсеивает узлы с аномальными задержками (эхо и реверберация) и решает систему гиперболических уравнений методом взвешенных наименьших квадратов. На выходе

— координаты цели с ошибкой пеленгации менее 3° .

Целеуказание (200 мс). Формируется стандартизированная тактическая метка в формате JSON/Protobuf, вычисляется уровень угрозы (Threat Level 0–5). Метка публикуется в MQTT/CoAP (для АТАК/WinTAK и систем РЭБ) и транслируется в информационную систему через шлюзовой адаптер.

Поражение (1 с до включения излучения). При получении разрешения (автоматического или ручного) система выбирает частотный профиль из библиотеки сигнатур, наводит луч (пан-тилт или фазированная решётка) и включает излучение. Длительность воздействия — от 1 до 10 секунд.

Оценка эффективности. Микрофонный массив одновременно записывает изменение акустической сигнатуры дрона (падение оборотов, изменение тона). Обратная связь по эффективности передаётся в уровень 3 для дообучения модели, в уровень 5 для обновления статуса цели и в уровень 6 для коррекции библиотеки частот.

Временные бюджеты. Суммарное время от прихода звука до выдачи координат в систему РЭБ составляет 800 мс, до включения акустического излучения — 1500 мс. При пиковой нагрузке (10 одновременно сопровождаемых целей) трафик в Mesh-сети не превышает 12 Кбит/с.

Таким образом, замкнутый цикл управления обеспечивает непрерывное наблюдение, мгновенное реагирование и постоянное самосовершенствование системы на основе данных

с поля боя.

Глава 3. Общая архитектура системы

Архитектура проекта «Слышь» строится как восьмиуровневая иерархия, где каждый уровень решает строго определённые функциональные задачи, а их совокупность образует замкнутый контур управления в реальном времени. Такое структурирование позволяет чётко разделить аппаратную часть, алгоритмы обработки, сетевые протоколы, тактические интерфейсы и критерии эффективности, обеспечивая масштабируемость, отказоустойчивость и возможность поэтапной модернизации.

3.1. Уровни системы (1–8): от аппаратуры до критериев приёмки

Уровень 1 (Аппаратный) — сенсорная периферия, непосредственно взаимодействующая с физической средой. Включает микрофонный массив из восьми MEMS-капсул ICS-43434 с цифровым интерфейсом I²S, многоканальный АЦП АК5578EN (24 бит, 48 кГц), GPS-приёмник u-blox ZED-F9P для высокоточной синхронизации (PPS 30 нс), и бортовой Edge-компьютер NXP i.MX 8M Plus с интегрированным NPU (2,3 TOPS). На этом уровне также реализованы системы климатической защиты (IP67, подогрев PTC-термисторами, ветрозащита DeadCat), питание от PoE+ и резерв-

ного аккумулятора LiFePO₄.

Уровень 2 (Цифровая обработка сигналов) — превращает сырые аудиопотоки в структурированные спектральные представления. Основные операции: КИХ-фильтрация высоких частот (срез 200 Гц, порядок 1740) для подавления ветрового и инфразвукового шума, вычисление спектрограмм с помощью STFT (окно 2048, перекрытие 75%), расчёт уровня звукового давления (SPL) с постоянной времени 100 мс и адаптивным порогом (медиана фона + 15 дБ). На выходе уровня формируются Mel-спектрограммы размером 128×128 для нейросетевого анализа и временные метки для пеленгации.

Уровень 3 (Интеллектуальный) — ядро принятия решений на основе машинного обучения. Используется мультизадачная свёрточная сеть EfficientNet-B0 (5,3 млн параметров) с двумя головами: одна классифицирует тип БПЛА (несколько классов) и состояние двигателя (3 класса), вторая — детектирует аномалии воспроизведения (анти-спуфинг). Время инференса на NPU в INT8-квантизации составляет менее 50 мс. Дополнительно реализован модуль адаптации (few-shot) на основе эмбедингов и прототипов, позволяющий добавлять новые типы дронов по 10–15 примерам без полного переобучения.

Уровень 4 (Сетевой) — обеспечивает синхронизацию, маршрутизацию и триангуляцию. Гибридная синхронизация времени (PTP по Ethernet + GPS PPS) даёт точность < 1 мкс,

что критично для TDOA. Mesh-сеть на базе LoRa с протоколом AODV передаёт сжатые эмбединги (200 байт/пакет) с трафиком < 2 Кбит/с с узла. Алгоритм GCC-RHAT оценивает задержки прихода сигнала, после чего выполняется взвешенная триангуляция, дающая ошибку пеленгации $< 3^\circ$ и ошибку координат < 10 м на дальности 500 м.

Уровень 5 (Тактический) — формирует стандартизированные тактические метки в форматах JSON (TacticalJSON), Protobuf и XML (CoT). Метка включает полный набор полей: время, координаты, скорость, курс, тип, уровень достоверности, вычисленный уровень угрозы (Threat Level 0–5). Через шлюзовые адаптеры метки транслируются в MQTT/CoAP для современных систем (АТАК/WinTAK) и в военные протоколы Link 16 (J3.1 Air Track) и их российские аналоги (ЕСУ ВМФ, ОСНОД). Здесь же реализован интерфейс оператора с тепловой картой и списком приоритетных целей.

Уровень 6 (Активное противодействие) — опциональный модуль акустического поражения, использующий фазированную решётку из 64 пьезоэлементов PZT-5Н. Излучатель генерирует узкий луч (угол $< 5^\circ$) с уровнем звукового давления 150 дБ на частотах 20–40 кГц, вызывая резонанс MEMS-гироскопов БПЛА. Управление частотой осуществляется через DDS-синтезатор AD9910 и усилитель класса D мощностью до 500 Вт. Время от целеуказания до включения излучения не превышает 1 с.

Уровень 7 (Инженерный) — обеспечивает эксплуатацию

онную надёжность. Включает режим «Тишина» (автономная работа при потере связи с активацией локальных светозвуковых сирен), управление энергопотреблением (дежурный ~3–4 Вт, активный ~10–12 Вт, пик с подогревом до 26 Вт), мониторинг состояния (температура, напряжение, RSSI, статус микрофонов) и прогнозирование отказов. Корпус класса IP67 рассчитан на температуру от -40 до +50°C и ветер до 40 м/с.

Уровень 8 (Критерии эффективности) — задаёт объективные, измеримые показатели приёмки системы. Вероятность правильного обнаружения Pd 0,95 на дальности до 1,5 км. Частота ложных тревог FAR 1 срабатывание в час на один узел. Время реакции 2,5 с от момента прихода звука до выдачи координат. Эти показатели верифицируются в ходе трёхэтапных испытаний (лабораторных, полевых и эксплуатационных) с использованием эталонных систем позиционирования.

Такое восьмиуровневое деление позволяет чётко определить зоны ответственности разработчиков, упрощает тестирование и сертификацию, а также даёт возможность заменять или модернизировать отдельные уровни без перестройки всей системы.

3.2. Физическое распределение компонентов: узел (Edge), шлюз (Gateway), центр управления

Физическая архитектура системы «Слышь» распределена по трём эшелонам, соответствующим вычислительной мощ-

ности, функциям и месту в иерархии управления.

Акустический узел (Edge) — это полностью автономное устройство, устанавливаемое на опоре ЛЭП. В его корпусе объединены:

- Уровень 1 (микрофонный массив, АЦП, GPS, подогрев, питание).
- Уровень 2 (DSP-фильтрация, STFT, вычисление SPL).
- Часть уровня 3 (экстракция эмбедингов и лёгкий детектор аномалий — для экономии ресурсов полная классификация может выполняться на шлюзе, но узел способен работать автономно).
- Часть уровня 4 (сетевой стек LoRa, синхронизация PTP/GPS).
- Часть уровня 6 (излучатель и усилитель, если узел оснащён модулем поражения).

Узел имеет встроенную энергонезависимую память для логирования и SD-карту для хранения спектрограмм. Питание — от PoE+ с резервным аккумулятором LiFePO₄ 12 В 100 А·ч, обеспечивающим до 7 суток автономной работы в дежурном режиме.

Шлюз сектора (Gateway) — вычислительный концентратор, обслуживающий группу из 10–20 узлов. Он располагается в центре сектора (например, на подстанции) и выполняет:

- Полный уровень 4 — сбор эмбедингов от всех узлов, кластеризацию DBSCAN, TDOA-триангуляцию, компенса-

цию эха.

- Часть уровня 5 — предварительное формирование тактических меток, вычисление Threat Level, буферизация данных.

- Часть уровня 7 — мониторинг состояния узлов сектора, управление энергосбережением.

Шлюз имеет значительно большую вычислительную мощность (например, многоядерный ARM или x86) и подключён к центру управления по высокоскоростному каналу (Ethernet, оптоволокно). Он также может выполнять роль RTP-мастера для синхронизации узлов.

Центр управления (Command Center) — верхний уровень, обычно расположенный на охраняемом объекте или в удалённом командном пункте. Здесь развёрнуты:

- Уровень 5 в полном объёме — тактическая карта, интерфейс оператора, интеграция с внешними системами ПВО и РЭБ, генерация рекомендаций по поражению.

- Уровень 3 (тяжёлое дообучение) — периодическое переобучение нейросетей на собранных данных.

- Уровень 7 (глобальный мониторинг) — контроль всех узлов и шлюзов, прогнозирование отказов, управление конфигурациями.

- Уровень 8 — сбор статистики эффективности, формирование отчётности для приёмочных испытаний.

Центр управления связан со шлюзами по защищённым каналам (VPN, военные радиолинии) и может дублировать-

ся для обеспечения отказоустойчивости.

Такое трёхзвенное распределение позволяет локализовать большую часть вычислений на узлах и шлюзах, снижая нагрузку на центральные каналы и обеспечивая автономную работу при потере связи с центром.

3.3. Информационные потоки: аудиопоток, эмбединги, тактические метки, обратные связи

В системе циркулируют четыре основных типа информации, различающихся по объёму, частоте и критичности.

Аудиопоток — самый «тяжёлый» канал, но он существует только внутри узла. Восемь каналов по 24 бита и 48 кГц дают скорость 9,2 Мбит/с. Этот поток никогда не покидает узел, а обрабатывается локально на уровнях 1–2. Такое решение обусловлено как ограничениями пропускной способности беспроводных сетей, так и требованиями конфиденциальности — сырые акустические данные не передаются по радио.

Эмбединги — основной тип данных, циркулирующий в Mesh-сети между узлами и шлюзом. Это векторы признаков размерностью 256 float32, полученные из выходного слоя нейросети. После квантизации до int8 и дельта-кодирования они сжимаются до ~200 байт на пакет. Частота отправки — 1 Гц в обычном режиме и до 5 Гц для приоритетных целей. Трафик с одного узла не превышает 2 Кбит/с, что позволяет LoRa-сети обслуживать десятки узлов. Эмбединги используются для:

- Группировки сообщений от разных узлов, принадлежащих одной цели (кластеризация по косинусному расстоянию).

- Верификации, что все узлы «слышат» один и тот же источник.

- Передачи классификационной информации (тип, состояние, уверенность) на шлюз, если узел выполнил полный инференс.

Тактические метки — финальный продукт обработки, передаваемый от шлюза в центр управления и внешние системы. Это структурированные сообщения в формате JSON/Protobuf (бинарный) или XML (CoT). Полная метка содержит до 20 полей, включая уникальный Track_ID, время, координаты, скорость, курс, тип, Threat Level, Confidence_Score, список узлов-участников. Размер первой метки — ~220 байт в Protobuf, последующие обновления с дельта-кодированием — ~60–80 байт. Частота обновления — от 0,5 до 5 Гц в зависимости от приоритета цели. Тактические метки передаются по защищённым каналам (Ethernet, военные радиолинии) с использованием протоколов MQTT (publish/subscribe), CoAP (REST), Link 16 и другие.

Обратные связи — служебные потоки, идущие в обратном направлении и обеспечивающие адаптацию и дообучение. К ним относятся:

- Коррекция порогов обнаружения (уровень 2) на основе

результатов классификации (уровень 3) — например, снижение чувствительности к частотам, идентифицированным как ветер или автомобиль.

- Обновление библиотеки частот поражения (уровень 6) на основе успешности атак.

- Сбор размеченных оператором примеров (ложные тревоги, пропущенные цели) для периодического дообучения нейросети (уровень 3).

- Статистика загрузки, SNR, температурные логи для инженерного мониторинга (уровень 7).

Обратные связи передаются по низкоприоритетным каналам (например, ночной FTP-сессии) или с использованием отдельного MQTT-брокера, чтобы не перегружать основной тактический трафик.

3.4. Временные бюджеты и критический путь цикла (2,5 с до выдачи координат, 3,5 с до включения поражения)

Временная диаграмма системы — это жёстко детерминированный конвейер, где каждый этап имеет фиксированный бюджет. Нарушение любого бюджета ведёт к потере актуальности данных и снижению эффективности противодействия.

От звука до тактической метки (2,5 с):

- 0 мс — звук достигает микрофонного массива.
- 100 мс — оцифровка, КИХ-фильтрация, вычисление SPL и формирование триггера (уровни 1–2).
- 100 мс — инференс нейросети (классификация + ан-

ти-спуфинг) на NPU (уровень 3). Этот этап запускается параллельно с отправкой временной метки в сеть.

- 300 мс — передача эмбедингов по Mesh-сети (3–5 хопов) и TDOA-триангуляция на шлюзе (уровень 4). Сюда входит сбор данных от минимум 4 узлов, кластеризация DBSCAN и решение системы уравнений.

- 200 мс — формирование тактической метки, вычисление Threat Level, сериализация и отправка (уровень 5).

- Итого: 700 мс в типовом сценарии, что значительно меньше предельных 2,5 с. Запас времени позволяет компенсировать сетевые задержки и перегрузки.

Дополнительно до включения акустического поражения (3,5 с):

- К моменту получения тактической метки (700 мс) уже известен тип БПЛА и координаты.

- 50 мс — выбор частотного профиля из библиотеки сигнатур (уровень 6).

- 700 мс — наведение луча (поворот пан-тилт платформы или электронная фокусировка фазированной решётки) с учётом упреждающих координат.

- 10 мкс — перестройка DDS-синтезатора на целевую частоту.

- 100 мс — включение усилителя и плавный выход на полную мощность (предотвращение теплового удара).

- Итого до излучения: 1,55 с, что укладывается в лимит 3,5 с с большим запасом.

Критический путь — это последовательность этапов, определяющая общее время реакции. Самые длительные звенья — передача по Mesh-сети (зависит от числа хопов) и TDOA-расчёт. Для их ускорения применяются:

- Приоритезация трафика — пакеты с высоким приоритетом (обнаружение угрозы) передаются вне очереди.
- Агрегация данных — шлюз накапливает сообщения от узлов за окно 100 мс, после чего запускает триангуляцию.
- Аппаратное ускорение — расчёт TDOA и решение системы уравнений выполняются на выделенном ядре ARM с плавающей точкой.

В пиковом сценарии (одновременное сопровождение 10 целей) суммарное время может возрасти до 1,2 с, но остаётся в пределах допуска. Для этого введены буферы сообщений (FIFO на 256 пакетов) и приоритетная очередь целеуказания, где критическим целям (Threat Level 4) выделяется до 80% пропускной способности канала.

3.5. Сценарии работы: дежурный режим, тревога, сопровождение, поражение, «Тишина»

Система управляется конечным автоматом с пятью состояниями, переходы между которыми определяются внешними событиями и внутренними таймерами.

Дежурный режим (Green) — основное состояние в отсутствие угроз. Активны только уровни 1 и 2: микрофонный массив, DSP-фильтрация, вычисление SPL и адаптивного порога. Уровни 3–6 находятся в режиме пониженного

энергопотребления (Deep Sleep) с сохранением возможности быстрого пробуждения (менее 10 мс). Tактический уровень отправляет только Heartbeat-сообщения (раз в 60 с) с метриками состояния. Потребление узла — 3–4 Вт.

Режим тревоги (Yellow) — активируется при превышении адаптивного порога SPL (фон + 15 дБ). Мгновенно пробуждаются:

- Уровень 3 — запускается инференс нейросети для классификации и анти-спуфинга.
- Уровень 4 — узел начинает рассылку эмбедингов в Mesh-сеть и ожидает данные от соседей.
- Запускается таймер «подтверждения цели» (2 секунды), в течение которого система ожидает получения минимум 4 временных меток от разных узлов.

Если за 2 секунды подтверждение не получено, система возвращается в дежурный режим (ложная тревога). Если подтверждено — переходит к сопровождению.

Режим сопровождения (Blue) — наступает после присвоения Track_ID и формирования устойчивого трека (как минимум 2–3 цикла обновления). Система непрерывно отслеживает цель с частотой обновления координат 5 Гц для быстро движущихся целей (скорость > 10 м/с) и 1 Гц для зависших или медленных. В этом режиме:

- Активны уровни 1–4 постоянно.
- Tактический уровень (5) выдаёт обновлённые метки и отображает цель на интерфейсе оператора.

- Уровень 6 (поражение) находится в режиме готовности, но не излучает.

- Потребление узла возрастает до 10–12 Вт.

Режим поражения (Red) — активируется при принятии решения об атаке (автоматически по правилам или по команде оператора). Условия для автоматического перехода: Confidence_Score 0,85, дистанция в пределах эффективной дальности (50–150 м), цель в зоне ответственности, отсутствие запрета от оператора. В этом режиме:

- Включается высоковольтное питание усилителя и система наведения (уровень 6).

- Излучатель генерирует сигнал на резонансной частоте, соответствующей типу БПЛА.

- Одновременно ведётся мониторинг изменения акустической сигнатуры дрона для оценки эффективности.

- При достижении эффекта (падение частоты винтов, изменение курса) или по команде оператора излучение прекращается.

- Потребление узла в пике может достигать 600 Вт (с учётом усилителя), поэтому в этом режиме обязательно питание от PoE+ или внешнего источника.

Режим «Тишина» (Black) — аварийное состояние, наступающее при потере связи с центром (Heartbeat таймаут > 30 с). Узел переходит в полную автономию:

- Отключает радиопередатчики (кроме периодических попыток восстановления — каждые 60 с).

- Продолжает локальную обработку (уровни 1–3) и запись событий во внутреннюю Flash.

- Активирует встроенные средства сигнализации — световой маячок (видимость до 500 м) и звуковую сирену (SPL 110 дБ).

- Питание переключается на аккумулятор, при этом среднее потребление снижается до 4–5 Вт за счёт отключения неиспользуемых модулей.

- В режиме «Тишина» узел может работать до 7 суток, периодически пытаясь восстановить связь.

Каждый из этих сценариев проработан с точки зрения временных бюджетов, энергопотребления и протоколов перехода, что гарантирует предсказуемое поведение системы в любых условиях, от мирного дежурства до интенсивных боевых действий.

Глава 4. Аппаратный уровень (уровень 1)

Аппаратный уровень системы «Слышь» представляет собой сенсорную периферию, непосредственно взаимодействующую с акустической средой. Именно здесь начинается весь технологический цикл: от преобразования звуковых колебаний в электрические сигналы до их первичной цифровой обработки. Надёжность и точность работы этого уровня определяют качество всей последующей обработки — от классификации до пеленгации.

4.1. Микрофонный массив: выбор MEMS-капсул (ICS-43434), круговое расположение 8 элементов

Выбор микрофонных капсул — одно из ключевых решений, влияющих на чувствительность, фазовую стабильность и, в конечном счёте, на точность пеленгации. В системе «Слышь» применены MEMS-микрофоны InvenSense ICS-43434.

Обоснование выбора. MEMS-технология имеет ряд решающих преимуществ перед электретными аналогами. Во-первых, цифровой выход I²S исключает необходимость в аналоговых предусилителях для каждого канала, что снижает шумы тракта и упрощает разводку печатной платы. Во-вторых, фазовая стабильность MEMS-капсул определяется

тактовой частотой, а не разбросом параметров аналоговых компонентов, что критично для TDOA-пеленгации. В-третьих, MEMS-структура менее чувствительна к температурным градиентам, чем электрет с его полимерной мембраной.

Сравнительные характеристики: ICS-43434 имеет отношение сигнал/шум (SNR) 65 дБА, частотный диапазон 60 Гц — 20 кГц, цифровой выход I²S и потребление 230–490 мкА. Для сравнения, электретный Primo EM272 даёт 80 дБ SNR, но требует аналоговой обработки и более чувствителен к вибрациям. Выбор MEMS, несмотря на более низкий SNR, оправдан: преимущества нивелируются необходимостью аналоговой обработки для электретов, а фазовая согласованность MEMS-капсул одного типа обеспечивает предсказуемые фазовые характеристики, критичные для TDOA.

Конфигурация массива. Применяется круговая геометрия из 8 капсул. Такая конфигурация даёт отличную пеленгацию на 360° в горизонтальной плоскости и хорошую — в вертикальной. Восемь капсул обеспечивают избыточность: при выходе из строя 1–2 элементов массив сохраняет работоспособность. Диаметр окружности составляет 100–120 мм — компромисс между разрешением по TDOA и габаритами модуля. Капсулы располагаются равномерно через 45°, а дополнительная капсула в центре массива может использоваться как опорная для калибровки фаз.

Переход на 4 капсулы снизил бы точность пеленгации и устойчивость к реверберации, а тетраэдрическая конфигу-

рация сложнее в калибровке и монтаже.

4.2. Предусилители и многоканальный АЦП (24 бит / 48 кГц): синхронный сбор данных

Для оцифровки сигналов с восемью микрофонных капсул применено интегральное решение с 8-канальным АЦП и встроенными программируемыми усилителями (PGA). Рекомендуемый компонент — АКМ AK5578EN (32 бит, 768 кГц макс., SNR 128 дБ, одновременная выборка) или его более доступный аналог Cirrus Logic CS5368 (24 бит, 192 кГц, SNR 114 дБ, TDM-выход).

Частота дискретизации выбрана 48 кГц, разрядность — 24 бита (с запасом до 32 бит). Подключение организовано через интерфейс I²S/TDM для синхронного считывания всех 8 каналов.

Критическое требование — синхронность выборок. Использование отдельных АЦП для каждого канала создаёт риск рассинхронизации фаз; 8-канальный АЦП с общей тактовой частотой гарантирует синхронность.

4.3. Анти-ветровая и климатическая защита: конструкции DeadCat и поролоновые экраны

Ветровой шум — один из главных врагов акустического обнаружения. Для его подавления применена комбинированная система «поролоновый экран + меховой чехол DeadCat».

Сравнительная эффективность в диапазоне 200–2000 Гц: без защиты — 0 дБ ослабления; поролоновый экран (Rycote)

даёт 10–15 дБ при ветре до 10 м/с; DeadCat (меховой) — 20–25 дБ при ветре до 20 м/с.

Конструктивное решение: внутренний слой — поролоновый экран из акустически прозрачного пенополиуретана для первичной защиты от прямого потока воздуха; внешний слой — съёмный меховой чехол DeadCat из синтетического меха с длиной ворса 20–30 мм для работы при ветре более 10 м/с. Коэффициент ослабления DeadCat составляет 20–25 дБ, что критически важно для сохранения сигнатуры БПЛА на фоне ветра. Меховой чехол обрабатывается гидрофобной пропиткой и выполняется быстросъёмным для сушки.

4.4. Подогрев мембран и термостатирование: расчёт мощности РТС-нагревателей

При отрицательных температурах возникает риск обледенения и ухудшения чувствительности микрофонов. Для решения этой задачи применены РТС-термисторы — саморегулирующиеся нагревательные элементы, не требующие внешнего управления.

Расчёт мощности при -30°C : объём защищаемого пространства — $\sim 0,5$ л; теплоизоляция — пенополиуретан ($\lambda = 0,025$ Вт/(м·К)) толщиной 10 мм; площадь теплопотерь — $\sim 0,05$ м²; перепад температур $\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$. Теплопотери: $Q = \lambda \times S \times \Delta T / d = 0,025 \times 0,05 \times 30 / 0,01 = 3,75$ Вт. С учётом запаса и тепловыделения электроники — 5–7 Вт на узел при -30°C .

Конструкция: нагревательные элементы (например,

EPICOS B59100) размещаются по периметру звукового порта, но не на пути акустической волны. Температурный датчик DS18B20 контролирует температуру и предотвращает перегрев. Для выравнивания температуры нагреватели устанавливаются на алюминиевой распределительной пластине. Порог отключения — $+5^{\circ}\text{C}$ (избегаем конденсации и температурных градиентов $> 2^{\circ}\text{C}$ на мембране). Управление мощностью — ШИМ-регулирование для точной поддержки температуры.

Прямой нагрев микрофонной капсулы может вызвать дрейф чувствительности и фазовые сдвиги, поэтому нагреватели выносятся на расстояние не менее 10 мм от капсул.

4.5. GPS-приёмник и временная синхронизация: модуль ZED-F9P, PPS-сигнал, TCXO

Точная временная синхронизация — основа TDOA-пеленгации. Ошибка синхронизации в 1 мкс даёт ошибку позиционирования $\sim 0,34$ м.

Выбор модуля. Основной модуль — u-blox ZED-F9P (точность PPS 30 нс RMS), многочастотный, поддерживает GPS/GLO/GAL/BDS, компактный. Резервный — Trimble Acutime 2000 (50 нс, промышленный). Точность 30 нс позволяет достичь ошибки позиционирования $< 3,4$ м по TDOA. Поддержка всех основных навигационных систем обеспечивает устойчивость к глушению.

Схема распределения тактовых сигналов. GPS-антенна ZED-F9P PPS (1 Гц, 30 нс) GPIO (прерывание) MCU. TCXO

(10 МГц) PLL АЦП (MCLK). Минимизация джиттера: PPS подаётся на вход GPIO с аппаратным таймером захвата; по фронту PPS запускается прерывание, привязывающее текущее значение счётчика семплов АЦП к абсолютному времени UTC. Для компенсации дрейфа между PPS-импульсами используется TCXO с частотой 10 МГц и стабильностью $\pm 0,5$ ppm. PLL генерирует тактовую частоту для АЦП ($48 \text{ кГц} \times 256 = 12,288 \text{ МГц}$) синхронно с TCXO. Результирующий джиттер привязки семпла не превышает ± 5 нс.

Алгоритм проверки качества синхронизации. Мониторинг наличия PPS — если отсутствует > 5 секунд — переход в режим holdover (удержание по TCXO). Чтение параметров HDOP и количества спутников через UART. Сравнение PPS с внутренним тактовым генератором — если расхождение > 1 мкс — сигнал тревоги. Взаимная проверка узлов — обмен служебными сообщениями с метками времени; если расхождение > 10 мкс — узел помечается как «несинхронизированный». При пропадании GPS — переход в holdover (стабильность ~ 1 мкс/мин); если пропадание > 10 минут — переход в режим «Тишина».

4.6. Бортовая вычислительная платформа: NXP i.MX 8M Plus (ARM + NPU), память, интерфейсы

В качестве бортового вычислительного ядра выбран NXP i.MX 8M Plus — интегрированное решение, объединяющее процессор, NPU, аудиоDSP и GPU в одном кристалле.

Характеристики: 4 ядра Cortex-A53 на 1,8 ГГц + ядро

M7; NPU производительностью 2,3 TOPS; аудиоDSP 800 МГц; поддержка I²S. Интеграция снижает стоимость, энергопотребление и сложность разводки. 2,3 TOPS достаточно для инференса лёгкой CNN (MobileNetV1 — до 500 кадров/с) на 8 каналах спектрограмм. АудиоDSP обеспечивает аппаратное ускорение FIR-фильтрации и STFT без загрузки CPU. Промышленный температурный диапазон (-40°C ... +105°C) подходит для полевых условий.

Альтернативы (Google Coral, Kendryte K210) уступают: Coral требует внешнего хост-процессора, увеличивая сложность и энергопотребление; K210 имеет 0,8 TOPS и может не справиться с обработкой 8 каналов в реальном времени.

Архитектура памяти:

- Кольцевой буфер АЦП: 2 МБ (8 каналов × 2048 отсчётов × 4 байта × 2 банка) — во внутренней SRAM.
- Буфер спектрограмм: 8 каналов × 128×128 Mel-бинов × 4 байта = 0,5 МБ — в DDR (1 Гб LPDDR4).
- Кэш нейросети: 8 МБ (веса модели ~3,8 МБ) — во внутренней SRAM или кэше.

Интерфейсы передачи данных:

- Ethernet (Gigabit) — основной канал на шлюз/центр, 1 Гбит/с.
- Wi-Fi (802.11ac) — резервный / для мобильных узлов, до 433 Мбит/с.
- LoRa (SX1262) — Mesh-сеть, передача эмбедингов, до 50 Кбит/с.

- I²S — подключение микрофонного массива (8 каналов), до 12,288 МГц.

Передача сырых аудиоданных по LoRa невозможна (9 Мбит/с против 50 Кбит/с), поэтому на борту выполняется полная обработка, а в сеть передаются только эмбединги (64–256 байт).

4.7. Энергопотребление и питание: PoE (802.3at), аккумулятор LiFePO₄, гибридная схема

Бюджет питания. В дежурном режиме (без подогрева, только DSP + пороговый детектор): 8 микрофонов ICS-43434 — 13 мВт; АЦП АК5578EN — ~150 мВт; i.MX 8M Plus (пониженная частота) — ~500 мВт; GPS ZED-F9P — ~200 мВт; LoRa (ожидание) — ~10 мВт. Итого: ~0,9 Вт.

В активном режиме (полная обработка + подогрев при -20°C): микрофоны — 13 мВт; АЦП — 150 мВт; i.MX 8M Plus (полная мощность) — ~2–3 Вт; NPU — ~1–2 Вт; GPS — 200 мВт; LoRa (передача) — ~100 мВт; подогрев — ~4–5 Вт. Итого: ~8–11 Вт. Целевой бюджет < 15 Вт достижим. При -40°C подогрев может потребовать до 10 Вт — в этом случае необходимо ограничить вычислительную нагрузку.

Источники питания. Основной — PoE по стандарту IEEE 802.3at (PoE+) до 30 Вт на порт. Схема: PoE (48 В) DC-DC (12 В) DC-DC (3,3 В, 5 В) нагрузка. Резервный — аккумулятор LiFePO₄ 12 В.

Расчёт ёмкости аккумулятора для 48 часов автономной работы: потребление 15 Вт, напряжение 12 В, ток 1,25 А. За

48 часов: 60 А·ч. С учётом КПД DC-DC (90%): 60 / 0,9 67 А·ч. С учётом глубины разряда LiFePO_4 (80%): 67 / 0,8 84 А·ч. Выбор: LiFePO_4 12 В 100 А·ч (с запасом).

Гибридная схема питания. Приоритет — РoЕ (если есть). При пропадании РoЕ — автоматический переход на аккумулятор (без прерывания работы, < 1 мс). При восстановлении РoЕ — переключение обратно и зарядка аккумулятора через встроенный зарядный контроллер.

4.8. Конструкция корпуса: материалы, IP67, виброзащита, калибровка микрофонов

Ориентация микрофонного массива. Выбрана горизонтальная ориентация (плоскость массива параллельна земле). БПЛА летают преимущественно в горизонтальной плоскости — горизонтальный массив даёт наилучшую пеленгацию по азимуту. Вертикальная пеленгация обеспечивается за счёт TDOA между узлами, а не внутри одного массива. Горизонтальная ориентация минимизирует влияние вибраций от ветра.

Антивибрационное крепление: микрофонный массив монтируется на силиконовых демпферах (резонансная частота < 10 Гц); электроника размещается в отдельном отсеке с дополнительной виброизоляцией.

Материалы корпуса. Основной корпус — анодированный алюминиевый сплав 6061-Т6 (прочный, хороший теплоотвод, экранирует помехи). Акустические окна — ударопрочный поликарбонат толщиной 1–2 мм с гидрофобным покры-

тием. Звуковые порты защищены акустически прозрачной мембраной Gore-Tex.

Класс защиты — IP67 (полная защита от пыли и кратковременное погружение до 1 м). Уплотнения — силиконовые прокладки (рабочий диапазон $-60^{\circ}\text{C} \dots +200^{\circ}\text{C}$). Внешняя поверхность корпуса — гидрофобное покрытие на основе SiO для защиты от обледенения. Звуковые порты выполнены с наклоном вниз для стекания конденсата.

Калибровка микрофонов на месте установки.

Процедура включает четыре этапа:

1. Подготовка: установка эталонного источника звука (калиброванный громкоговоритель) на расстоянии 1–2 м от массива; подключение эталонного измерительного микрофона (класс 1).

2. Калибровка чувствительности: воспроизведение тонального сигнала 94 дБ SPL @ 1 кГц; запись уровней с каждого микрофона; вычисление поправочных коэффициентов для приведения к единой чувствительности.

3. Калибровка фазы: воспроизведение широкополосного сигнала (chirp) в диапазоне 200–2000 Гц; вычисление взаимной корреляции между каналами; определение фазовых задержек и сохранение их как поправок.

4. Верификация: повторение измерения с источником под углом 0° , 45° , 90° ; проверка, что расхождение между каналами не превышает $\pm 0,5$ дБ и $\pm 2^{\circ}$ по фазе.

Процедура автоматизирована и выполняется по команде

с центра; все коэффициенты сохраняются в энергонезависимой памяти узла. Калибровка в поле без безэховой камеры даёт погрешность из-за отражений, поэтому рекомендуется проводить её в тихую безветренную погоду на открытом пространстве.

Глава 5. Уровень цифровой обработки сигналов (DSP, уровень 2)

Уровень цифровой обработки сигналов — это «слуховой нерв» системы «Слышь». Именно здесь сырой многоканальный аудиопоток превращается в структурированное спектральное представление, пригодное для машинного анализа, а также формируются первые признаки тревоги. Все алгоритмы этого уровня работают в реальном времени на бортовом Edge-компьютере, и их производительность напрямую определяет, сможет ли система «услышать» дрон раньше, чем тот достигнет цели.

5.1. Пре-фильтрация: КИХ-фильтр высоких частот (срез 200 Гц, порядок 1740), окно Кайзера

Первым барьером на пути акустического сигнала становится фильтр высоких частот, задача которого — отсеять ветровой шум, инфразвуковые колебания и низкочастотные помехи от промышленных объектов. В системе «Слышь» для этой цели выбран КИХ-фильтр (конечная импульсная характеристика) с частотой среза 200 Гц и порядком 1740 коэффициентов.

Выбор КИХ-фильтра вместо БИХ-аналога обусловлен требованием линейной фазы во всём рабочем диапазоне.

Для ТДОА-пеленгации критически важно, чтобы групповая задержка сигнала была постоянной для всех частот — любое фазовое искажение от БИХ-фильтра привело бы к систематической ошибке в оценке временных задержек между каналами. КИХ-фильтры со строго линейной фазой (тип I или II) гарантируют это свойство, что делает их единственным приемлемым выбором для фазочувствительных измерений.

Расчёт порядка фильтра выполнен с использованием окна Кайзера, обеспечивающего затухание в полосе заграждения не менее 60 дБ. При частоте дискретизации 48 кГц и ширине переходной полосы 100 Гц (от 150 до 250 Гц) формула Кайзера даёт порядок $N = 1740$. Коэффициенты фильтра генерируются в среде Python с помощью функции `scipy.signal.firwin` с параметрами `pass_zero='highpass'`, `window=('kaiser', beta)`, где параметр β (5.65) рассчитан по эмпирической формуле для затухания 60 дБ.

Полученный фильтр имеет впечатляющие характеристики: полоса подавления до 200 Гц ослаблена более чем на 60 дБ, переходная зона укладывается в 100 Гц, а фазо-частотная характеристика остаётся линейной вплоть до частоты Найквиста. Такой фильтр не только подавляет инфразвук, но и сохраняет форму огибающей сигнала дрона, что критически важно для последующего обнаружения огибающей и расчёта SPL.

5.2. Адаптивные методы подавления ветрового шума и инфразвука

Фиксированный КИХ-фильтр — лишь первый слой защиты. В реальных полевых условиях ветровой шум нестационарен и может меняться по спектральному составу в зависимости от скорости и направления ветра, а также от местных турбулентностей. Поэтому система дополняется адаптивными механизмами.

Основной подход — использование адаптивного порога для детектирования огибающей, о котором подробно рассказано в разделе 5.5. Однако на этапе пре-фильтрации также применяется динамическая коррекция граничной частоты: при сильном ветре (скорость > 10 м/с) частота среза может быть временно поднята до 250 Гц, чтобы ещё сильнее подавить низкочастотные флуктуации. Это решение принимается на основе показаний внешнего датчика ветра или по косвенным признакам — анализу спектральной плотности мощности в диапазоне 50–200 Гц.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.