DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.9

УДК: 681.884

Архитектура распределённой оптико-акустической информационно-измерительной системы периметрального контроля

Е.И. Минаков[2], В.Н. Гридин[1], В.И. Солодовников[1], Д.Г. Андронычев[2], С.А. Лагутин[2]

**[1]Центр информационных технологий в проектировании РАН,
Россия, Московская область, г. Одинцово**

**[2]Тульский государственный университет,
Россия, Тула**

Статья поступила в редакцию 20 августа 2026 г.

Аннотация. В статье рассматривается архитектура распределённой оптико-акустической информационно-измерительной системы, предназначенной для периметрального контроля малоразмерных летательных объектов. Основное внимание уделено организации совместной работы акустического и оптического каналов и формированию на их основе достоверной информации о наблюдаемом событии. Предлагаемая структура объединяет пространственно разнесённые измерительные узлы с локальной обработкой данных и центральный модуль, в котором выполняется сопоставление результатов наблюдений. Акустические сигналы регистрируются синхронно микрофонным массивом и обрабатываются в пределах одного временного фрагмента. Это позволяет согласованно выполнять обнаружение объекта, его классификацию и определение направления на источник. Полученная акустическая оценка используется для выбора сектора оптического наблюдения, после чего данные двух каналов сопоставляются по времени и пространственному положению. При обработке учитываются качество измерений и неопределённость полученных оценок, что позволяет отличать отсутствие объекта от ситуации, в которой надёжное наблюдение

невозможно. В работе определены требования к временной и пространственной согласованности измерений, калибровке оборудования и размещению узлов. Рассмотрена работа системы при ухудшении условий наблюдения, отказе отдельного канала или временной потере связи. Предложенная архитектура предусматривает сохранение исходных фрагментов и результатов обработки, поэтому полученные решения могут быть повторно проверены и проанализированы. Для оценки работоспособности системы сформирован порядок стендовых и натурных испытаний. Он позволяет проверять точность определения направления и положения объекта, устойчивость синхронизации, своевременность формирования результатов и работу системы при различных условиях наблюдения. Количественные характеристики разработанной архитектуры предполагается определять экспериментально по результатам испытаний.

Ключевые слова: информационно-измерительная система, оптико-акустический контроль, периметральный контроль, оптико-акустический измерительный узел, микрофонный массив, акустическая пеленгация.

Финансирование: Работы проводились при поддержке Гранта в форме субсидии на проведение научных исследований Комитета по науке и инноватике Тульской области №15 от 21 июня 2024 г.

Автор для переписки: Солодовников Владимир Игоревич, info@ditc.ras.ru

Введение

Распространение малоразмерных летательных объектов сформировало задачу непрерывного контроля локального воздушного пространства над критически важными и иными охраняемыми объектами. Малые размеры, низкая высота полёта, сложный фон и ограниченное время реакции затрудняют обнаружение и сопровождение; ни один одиночный физический канал не обеспечивает устойчивое решение во всех условиях [1, 2, 11, 12]. Радиолокационный канал информативен по дальности, но чувствителен к малой эффективной площади рассеяния и фоновым отражениям. Радиочастотный канал зависит от активности

и типа линии связи. Оптический канал даёт интерпретируемое изображение, однако его эффективность снижается при малом числе пикселей цели, тумане, осадках, засветке и недостаточной освещённости [1, 2].

Акустический канал дополняет оптическое наблюдение: по шуму винтомоторной группы микрофонная решётка может обнаружить объект и оценить направление на него. Возможности акустического обнаружения зависят от дальности, ветра, уровня фонового шума и акустических помех [5-7]. Мультимодальные наборы данных и экспериментальные системы подтверждают возможность совместного применения видимого, инфракрасного и акустического каналов [3, 4, 8]. Для согласованной интерпретации таких данных необходимы единая шкала времени, общая система координат, документированные результаты калибровки и единый формат сообщений.

Цель статьи – определить структуру распределённой оптико-акустической ИИС, которая преобразует физические сигналы в формализованное сообщение о событии. Оно содержит время, класс, направление или координаты объекта и показатели качества результата. В работе задаются состав узлов, единый порядок обработки акустических данных, требования к синхронизации и калибровке, условия наблюдаемости и правила работы при недоступности части каналов. Средства физического противодействия не рассматриваются; выходом системы является измерительная информация для оператора или внешнего комплекса.

1. Постановка задачи и состав измерительной информации

Результат i-го канала представим как преобразование параметров объекта и среды, искажённое шумами и помехами:

$$z_{i(t)} = h_{i\left(x(t)\right)} + n_{i(t)},\ i \in \{a, o\}, \tag{1}$$

где $z_{i(t)}$ – результат измерения; $x(t)$ – вектор параметров объекта и среды; $h_{i(x(t))}$ – оператор измерительного преобразования; $n_{i(t)}$ – совокупность шумов

и помех; индексы *a* и *o* соответствуют акустическому и оптическому каналам. Для k-го пространственно закреплённого узла центральный модуль получает расширенный вектор наблюдения:

$$z_{k(t)} = \left[z_{(a,k)(t)}, z_{(o,k)(t)}, q_{k(t)}, r_k \right]^T, \tag{2}$$

в котором $q_{k(t)}$ содержит раздельные поля качества, доступности, уверенности классификатора и неопределённости оценки, а r_k – координаты, ориентацию и идентификатор системы отсчёта. Для акустики фиксируются отношение сигнал/шум, перегрузка канала, пропуски отсчётов и состояние синхронизации. Для оптического канала учитываются освещённость, резкость, засветка, перекрытие изображения и работоспособность камеры. Также сохраняются признаки потери сообщений и сведения о применённой конфигурации и калибровке. По этим данным центральный модуль отличает отсутствие объекта при исправных каналах от ситуации, когда надёжное измерение получить невозможно.

Помимо метки класса, выходная запись содержит указание канала, интервал времени наблюдения, сведения о неопределённости направления и действовавших ограничениях. Единый состав записи позволяет сопоставлять результаты разных узлов и проверять их по архивным данным.

2. Иерархическая структура распределённой ИИС

Предлагаемая архитектура (рис. 1) образована пятью уровнями. Сенсорный уровень включает оптико-акустические узлы с известными координатами. Уровень локальной обработки проверяет данные, подавляет помехи, оценивает качество и формирует первичную гипотезу. Уровень связи передаёт сообщения с временными метками и контролирует их доставку и порядок. Центральный модуль сопоставляет данные разных узлов, уточняет класс и положение объекта и обновляет состояние события. Выходной уровень включает базу событий, архив, рабочее место оператора и интерфейс внешней системы охраны.

Архитектура предусматривает обратную передачу команд. Центральный модуль может навести поворотную камеру в акустически определённый сектор, запросить исходный фрагмент из кольцевого буфера, изменить частоту обновления либо инициировать диагностику.

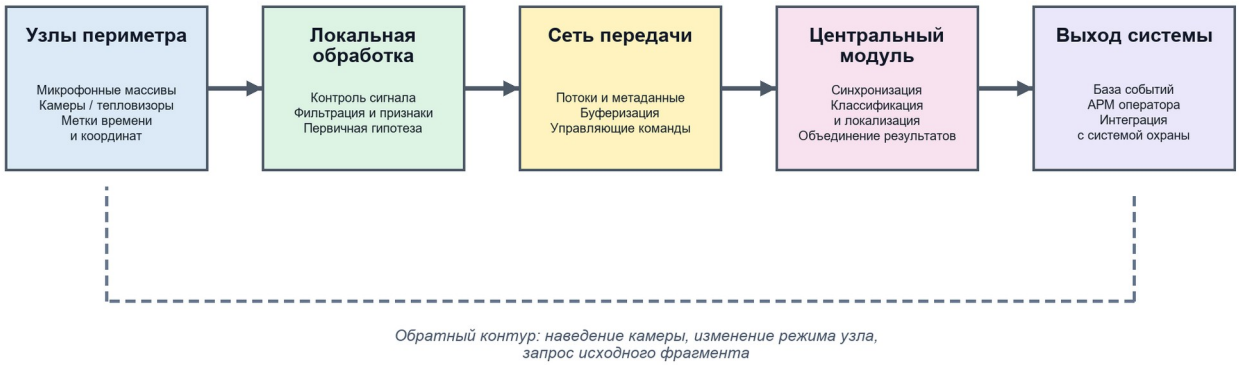


Рис. 1. Обобщённая структура распределённой оптико-акустической ИИС.

Система поддерживает дежурный и событийный режимы, а также работу при частичной недоступности каналов. В последнем случае выходная запись содержит сведения о недоступном канале, причине ограничения и статусе подтверждения события.

3. Структура оптико-акустического измерительного узла

Локальный узел (рис. 2) содержит акустическую и оптическую подсистемы общие средства синхронизации и калибровки, локальный вычислительный модуль, кольцевой буфер, сетевой интерфейс, средства самодиагностики и хранилище конфигурации с контролем версии и целостности. Микрофонный массив устанавливается на жёстком основании с ветрозащитой; каналы оцифровываются синхронно от общего такта. Камера может быть обзорной, поворотной или дополненной тепловизором. Параметры взаимного положения массива и камеры определяются при внешней калибровке и сохраняются в конфигурации узла.

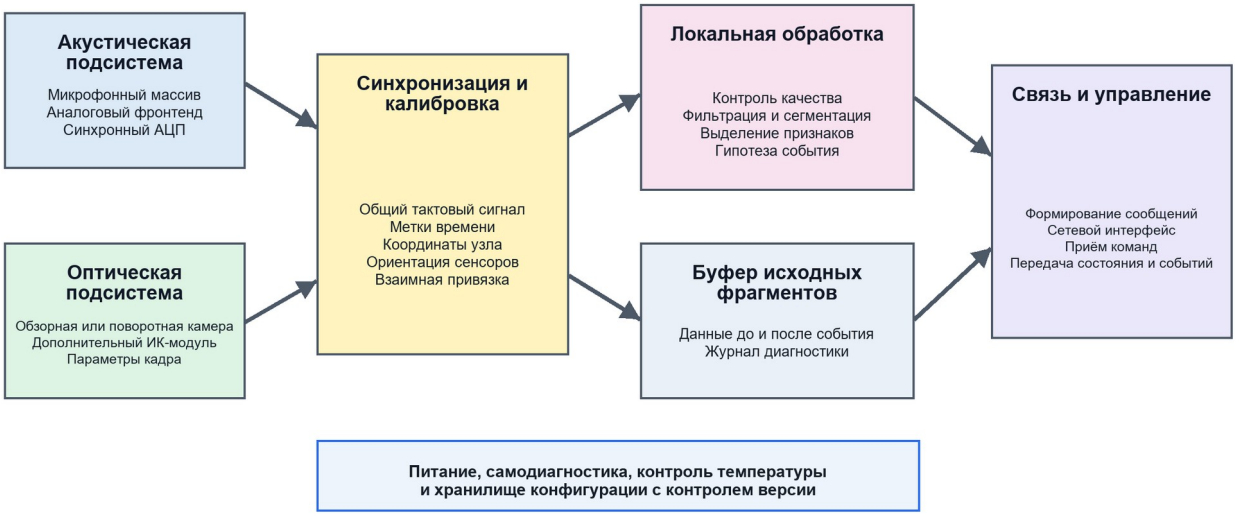


Рис. 2. Функциональная структура оптико-акустического измерительного узла.

Акустическая часть узла работает как единая последовательность обработки (рис. 3). Все микрофоны синхронно регистрируют общий временной фрагмент. После контроля целостности зарегистрированный фрагмент сохраняется в кольцевом буфере. Для алгоритмов обнаружения, классификации и оценки направления из него формируются калиброванные и предварительно обработанные данные. Частота дискретизации и длина окна задаются одной конфигурацией узла и выбираются по рабочей полосе микрофонов и условиям эксперимента. Все оценки относятся к одному и тому же участку сигнала и одной метке времени.

Из согласованного фрагмента формируются спектральные признаки для распознавания и межканальные задержки для определения направления. Обе операции выполняются над общими исходными данными. Общий идентификатор связывает класс, пеленг и показатели качества с одним временным фрагментом.



Рис. 3. Последовательность акустической регистрации и обработки.

Межканальные временные задержки оцениваются методами корреляционной обработки [6, 10]. Разность времени прихода звука к i-му и j-му микрофонам связана с положением источника s и координатами микрофонов r_i, r_j выражением:

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{s - r_i - s - r_j}{c}, \tag{3}$$

где c – скорость звука. По набору таких задержек оценивается направление на источник. Все микрофонные каналы работают от общего тактового сигнала. Постоянные межканальные сдвиги измеряются при калибровке и компенсируются, а стабильность временной шкалы проверяется по контрольному сигналу.

Оптический канал работает в той же шкале времени. При появлении устойчивой акустической гипотезы камера получает сектор наблюдения, после чего центральный модуль сопоставляет акустическое направление и положение объекта в кадре. Если камера уже сопровождает цель, её данные могут уточнить выбор акустического сектора. Исходные измерения обоих каналов сохраняются раздельно вместе с результатом их совместной интерпретации.

4. Синхронизация, калибровка и наблюдаемость

Для каждого узла задаются локальные системы координат микрофонного массива и камеры, а также глобальная система координат. Матрица поворота, вектор переноса, дата и метод калибровки, а также оценка её неопределённости хранятся в паспорте узла. Ошибка ориентации вызывает систематическое рассогласование акустического пеленга и оптического направления и учитывается в общей неопределённости результата.

При независимости основных составляющих квадрат стандартной неопределённости оценки задержки представляется суммой вкладов дискретизации, синхронизации, геометрии массива, условий среды и алгоритма:

$$u^{2(\tau_{ij})} = u^2_{disc} + u^2_{sync} + u^2_{geom} + u^2_{env} + u^2_{alg}. \tag{4}$$

Каждая составляющая в (4) оценивается отдельно: u_{disc} – по интервалу дискретизации, u_{sync} – по общему контрольному сигналу, u_{geom} – по точности измерения координат микрофонов, u_{env} – по повторным записям источника с известным положением, а u_{alg} – по испытательной выборке. Температура, ветер, отражения от сооружений и фоновые помехи фиксируются вместе с результатом испытания. Сопоставление составляющих показывает, какая причина ограничивает точность в конкретных условиях.

Проверка пеленгационной калибровки выполняется при монтаже узла, после изменения его положения и далее с заданной периодичностью. Контрольный источник размещают в нескольких известных направлениях, сравнивают измеренный и заданный пеленги и сохраняют поправки вместе с датой проверки. Если расхождение превышает допустимый уровень, узел переводится в диагностический режим и не участвует в точной локализации до повторной настройки.

Если геометрия массива позволяет оценивать азимут и угол места, один узел формирует пространственный пеленг, но не определяет дальность. Получение координат по данным двух пространственно разнесённых микрофонных массивов рассмотрено в [9] (рис. 4).

Перед объединением пеленгов центральный модуль проверяет, относятся ли они к одному событию. Временные интервалы должны перекрываться с учётом неопределённости меток времени; задержка доставки учитывается при выборе размера буфера согласования. Оценки класса и направления движения не должны противоречить друг другу. Для каждого принятого пеленга сохраняются исходное измерение, номер узла, метка времени, угловая неопределённость и версия калибровки. Такая проверка снижает вероятность ложной локализации при случайном пересечении направлений на разные объекты.

Из-за измерительных ошибок пеленги обычно не пересекаются в одной точке. Координата оценивается по наименьшему взвешенному угловому рассогласованию, причём вес каждого пеленга зависит от его неопределённости.

Если угол пересечения мал, остаточное рассогласование превышает порог, решение находится вне контролируемой зоны или позади узла, точечная координата не выдаётся. В записи остаются исходные пеленги и расширенная область положения. При наличии трёх и более узлов сравниваются решения по разным парам; противоречие сохраняется для диагностики, а пороговые значения определяются полевыми испытаниями.

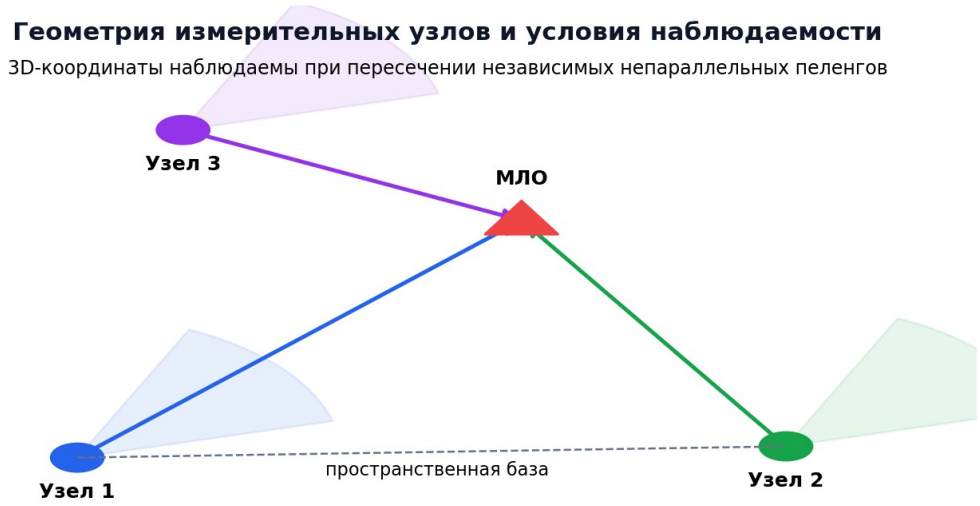


Рис. 4. Геометрия измерительных узлов и условия наблюдаемости координат.

Точность координатной оценки снижается при уменьшении угла между пеленгами. В предлагаемой архитектуре при неблагоприятной геометрии система формирует расширенную область возможного положения объекта и при необходимости использует данные соседнего узла. Для прямолинейного участка без препятствий зоны покрытия предварительно аппроксимируются кругами, а узлы располагаются вдоль границы. Если h – расстояние от линии их размещения до дальней границы контролируемой полосы, то при $h \le R_e$ шаг d, обеспечивающий перекрытие зон при эффективном радиусе R_e, ограничен условием:

$$d \le 2\sqrt{R_e^2 - h^2}\,. \tag{5}$$

Эффективный радиус R_eзадаётся отдельно для каждого канала и сценария по требуемой вероятности обнаружения; для совместного покрытия выбирается меньшее из экспериментально полученных значений. На углах, в акустической

тени и возле постоянных источников помех шаг уменьшается; перекрытие зон одновременно повышает доступность и создаёт пространственную базу для локализации.

Предварительная схема размещения уточняется на местности. Для каждого узла строят карту слышимости и видимости, отмечают закрывающие сооружения, растительность и постоянные источники шума. Затем проверяют, что соседние зоны имеют достаточное перекрытие и дают различающиеся направления на контрольную траекторию. Карты слышимости и видимости заменяют единое паспортное значение дальности реальными данными для конкретных участков периметра.

5. Информационные потоки и алгоритм функционирования

Унифицированный заголовок сообщения содержит версию формата, номера узла и последовательности, тип сообщения, начальную метку времени, длительность или число отсчётов, координатную привязку, показатели качества, размер полезной нагрузки и контрольную сумму. Метка присваивается при регистрации. В дежурном режиме передаются результаты измерений, состояние узла и диагностические сообщения. Аудио- и видеофрагменты из кольцевого буфера отправляются при обнаружении события, по диагностическому запросу или при выборочном контроле. Буфер сохраняет интервалы до и после события, поэтому непрерывная передача исходных потоков не требуется.

Для событийных сообщений контролируется время доставки; команды и конфигурация требуют подтверждения, а архивные фрагменты могут передаваться из очереди. Канал проверяют при одновременных событиях на нескольких узлах, измеряя потери, нарушения порядка и задержку сообщений. Параметры сети выбирают по результатам испытания и составу оборудования.

В долговременный архив переносятся события, показатели качества, конфигурация и отобранные исходные фрагменты. При испытаниях по эталонным траекториям дополнительно сохраняются фрагменты подтверждённых событий,

пропусков обнаружения и ложных срабатываний. Они нужны для повторной обработки, сравнения алгоритмов и установления причин ошибок.

Центральный модуль включает приёмник, буфер временного согласования, хранилище конфигураций, средства объединения локальных результатов и повторной обработки запрошенных фрагментов, локализацию, автомат состояний и интерфейс с архивом. Автомат работает по схеме «дежурный режим – предварительное обнаружение – подтверждённое или неподтверждённое событие – завершение сопровождения». Результат одного канала сначала проверяется в последовательных временных окнах. Подтверждением служит его устойчивость или согласованное наблюдение второго канала; пороги задаются в конфигурации и проверяются экспериментально. Противоречие не маскируется усреднением: несогласованные оценки сохраняются раздельно для накопления дополнительных данных.

Типовой сценарий начинается с акустической гипотезы. Узел сообщает сектор и показатель качества; центральный модуль выбирает подходящую камеру и проверяет временное и пространственное согласование. Подтверждённые измерения объединяются в одну запись, остальные сохраняются как неподтверждённые. Если объект первой замечает камера, акустические данные используются для независимой проверки.

Работа в реальном масштабе времени контролируется по сквозной задержке:

$$T_{\Sigma} = T_{reg} + T_{pre} + T_{net} + T_{alg} + T_{fuse} \le T_{upd}, \tag{6}$$

где T_{reg} – время накопления фрагмента, T_{pre} – предварительная обработка, T_{net} – передача и буферизация, T_{alg} – выполнение алгоритмов обнаружения, классификации и оценки направления или координат, T_{fuse} – объединение результатов, T_{upd} – допустимый период обновления. Условие (6) проверяется при максимальном ожидаемом числе одновременных событий: средняя задержка без нагрузки не характеризует рабочий режим.

6. Работа при частичной недоступности каналов и программа испытаний

При недоступности оптического канала акустическая гипотеза подтверждается только после повторения в заданном числе последовательных окон. Если акустический канал недоступен, камера может продолжать сопровождение обнаруженного объекта, но первичное наведение по звуку невозможно. При нарушении синхронизации данные сохраняются для диагностики, а акустический пеленг не формируется до восстановления общей шкалы времени. При потере связи данные накапливаются локально и затем передаются вместе с журналом состояния. Неисправность оформляется диагностическим событием. В выходной записи указываются причина ограничения, доступные каналы и применённый критерий подтверждения.

На стенде измеряют стабильность временной шкалы, повторяемость калибровки, время обработки и доставки, а также реакцию на заданные отказы. Полевой этап включает построение карты покрытия, полёты по эталонной траектории и оценку геометрии пересечения пеленгов. Для воспроизводимости сохраняются условия измерений, конфигурация, версия программного обеспечения и результаты калибровки. Системные показатели оцениваются отдельно от качества конкретного классификатора.

При испытаниях оцениваются вероятность обнаружения и число ложных событий за единицу времени; для классификации – доля правильных решений по классам; для локализации – угловая и координатная ошибки. Также измеряются время формирования события, доступность узлов и полнота архивной записи. Результаты разделяются по дальности, погоде, освещённости и фоновому шуму.

Для расчёта метрик полёт делят на заранее заданные интервалы. Событие сопоставляют с независимой эталонной траекторией с заданными временным и пространственным допусками. Для каждого интервала сохраняют дальность, направление, состояние каналов и условия наблюдения. Такой порядок не позволяет засчитать несколько сообщений одного сопровождения как несколько обнаружений и делает разбор пропусков воспроизводимым.

Варианты «только акустика», «только оптика» и «совместная обработка» сравнивают на одних и тех же полётных сессиях и при неизменной конфигурации. Для каждого варианта приводят абсолютные значения показателей и доверительные интервалы. Это позволяет установить, уменьшает ли объединение число ложных событий, повышает ли доступность наблюдения и как влияет на сквозную задержку. Полученные выводы относятся только к проверенным условиям; их перенос на другой участок или сезон требует повторных испытаний.

Приведённые соотношения задают проектные критерии, но не доказывают прирост вероятности обнаружения или точности локализации. Его оценивают по независимым полётным сессиям, а частоту ложных событий – по длительным фоновым записям. Указываются число испытаний и доверительные интервалы отдельно для штатной работы и частичной недоступности каналов.

Заключение

Разработана структура распределённой оптико-акустической ИИС от физического датчика до формализованного сообщения о событии. Она объединяет показатели качества, единую обработку синхронных акустических сигналов, временную и пространственную привязку и учёт неопределённости. При плохой наблюдаемости вместо точечной координаты выдаётся расширенная область положения. Локальная обработка и передача исходных фрагментов по событию сохраняют возможность проверки результата.

Для каждого режима фиксируются доступные функции и данные. Матрица «требование – показатель – испытание» задаёт программу стендовой и натурной проверки. Следующий этап – оценка вероятности обнаружения, частоты ложных событий, точности классификации и локализации, стабильности калибровки и сквозной задержки.

Финансирование: Работы проводились при поддержке Гранта в форме субсидии на проведение научных исследований Комитета по науке и инноватике Тульской области №15 от 21 июня 2024 г.

Литература

1. Wang J., Liu Y., Song H. Counter-Unmanned Aircraft System(s) (C-UAS): State of the Art, Challenges, and Future Trends // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2021. – Vol. 36, No. 3. – P. 4-29. https://doi.org/10.1109/MAES.2020.3015537
2. Khawaja W., Ezuma M., Semkin V., Erden F., Ozdemir O., Guvenc I. A Survey on Detection, Classification, and Tracking of AAVs Using Radar and Communications Systems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2026. – Vol. 28. – P. 3272-3310. https://doi.org/10.1109/COMST.2025.3554613
3. Svanström F., Alonso-Fernandez F., Englund C. A dataset for multi-sensor drone detection // Data in Brief. – 2021. – Vol. 39. – Art. no. 107521. https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107521
4. Svanström F., Englund C., Alonso-Fernandez F. Real-Time Drone Detection and Tracking With Visible, Thermal and Acoustic Sensors // 2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). – Milan, Italy: IEEE, 2021. – P. 7265-7272. https://doi.org/10.1109/ICPR48806.2021.9413241
5. Карташов В.М., Олейников В.Н., Шейко С.А., Бабкин С.И., Корытцев И.В., Зубков О.В., Анохин М.А. Информационные характеристики звукового излучения малых беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. – 2017. – Вып. 191. – С. 181-187. https://doi.org/10.30837/rt.2017.4.191.18
6. Карташов В.М., Корытцев И.В., Олейников В.Н., Зубков О.В., Бабкин С.И., Шейко С.А., Левский Н.А., Селезнев И.С. Алгоритмы пеленгации беспилотных летательных аппаратов по их акустическому излучению // Радиотехника. – 2019. – Вып. 196. – С. 22-31. https://doi.org/10.30837/rt.2019.1.196.02
7. Андрющенко М.С., Голик А.М., Сахнов С.А., Терешин С.Н. Обнаружение беспилотных летательных аппаратов с помощью микрофонных решеток // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2024. – № 1 (131). – С. 131-138. https://doi.org/10.53816/20753608_2024_1_131 – URL: https://journals.rcsi.science/2075-3608/article/view/320037 (дата обращения: 03.09.2026).

8. Ding S., Guo X., Peng T., Huang X., Hong X. Drone Detection and Tracking System Based on Fused Acoustical and Optical Approaches // Advanced Intelligent Systems. – 2023. – Vol. 5, No. 10. – Art. no. 2300251. https://doi.org/10.1002/aisy.202300251
9. Lim J., Joo J., Kim S.C. Performance Enhancement of Drone Acoustic Source Localization Through Distributed Microphone Arrays // Sensors. – 2025. – Vol. 25, No. 6. – Art. no. 1928. https://doi.org/10.3390/s25061928
10. Knapp C.H., Carter G.C. The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay // IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 1976. – Vol. 24, No. 4. – P. 320-327. https://doi.org/10.1109/TASSP.1976.1162830
11. Гридин В.Н., Курбатский С.А., Минаков Е.И., Евдокимов И.А., Полынкин А.В., Башеров М.С. Математическая модель формирования микродоплеровской составляющей радиолокационного сигнала для различных классов БПЛА // Радиотехника и электроника. – 2026. – Т. 71, № 4. – С. 465-475. https://doi.org/10.7868/S3034590126040072 – URL: https://journals.rcsi.science/0033-8494/article/view/442106 (дата обращения: 03.09.2026)
12. Минаков Е.И., Гридин В.Н., Андронычев Д.Г., Солодовников В.И., Сычугов А.А., Французова Ю.В. Интерпретируемая акустическая классификация малоразмерных летательных аппаратов с использованием метода Grad-CAM // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.4

Для цитирования:

Гридин В.Н., Минаков Е.И., Солодовников В.И., Андронычев Д.Г., Лагутин С.А. Архитектура распределённой оптико-акустической информационно-измерительной системы периметрального контроля // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.9.9