

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата технических наук, доцента

БОЙКАЧЁВА Павла Валерьевича

на диссертационную работу

ПУЗАНОВА Александра Денисовича

«Обнаружение малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

1. Соответствие диссертации специальности и отрасли науки

Диссертация Пузанова Александра Денисовича «Обнаружение малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам» соответствует отрасли технических наук, паспорту специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения. Основные научные результаты диссертации, положения, выносимые на защиту, соответствуют следующим пунктам раздела III паспорта специальности:

2. Генерация, усиление, преобразование, прием и передача сигналов. Модуляция. Демодуляция. Спектры, корреляционные функции, математические и статистические модели сигналов;

3. Статистическая теория обработки сигналов в радиотехнических, других электронных системах и устройствах. Фильтрация сигналов на фоне помех в задачах обнаружения, разрешения, измерения и распознавания;

6. Преобразование волн различных физических полей в электрические сигналы, их анализ и обработка.

2. Актуальность темы диссертации

В условиях стремительного развития технологий, связанных с появлением малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА), задача их обнаружения становится особенно важной. Эти устройства, обладая высокой маневренностью и малой заметностью, представляют собой как новые возможности, так и потенциальные угрозы в различных сферах – от гражданской авиации до военных операций.

Для эффективного решения задачи обнаружения БЛА необходимо интегрировать современные технологии, включая радарные системы, оптические сенсоры и алгоритмы машинного обучения. Однако у каждой из этих технологий есть свои недостатки. Например, радарные системы могут испытывать трудности при обнаружении малых и низколетящих БЛА, особенно в условиях сложного рельефа или при наличии помех от окружающей среды. Оптические сенсоры, хотя и обеспечивают высокое разрешение изображений, ограничены в своей эффективности при плохих погодных условиях или в ночное время.

В связи с этими ограничениями возникает необходимость использования акустических средств обнаружения, особенно в области малых высот и малых дальностей. Акустические системы способны обнаруживать БЛА по характерным акустическим шумам, создаваемым их двигателями и винтами, что делает их особенно полезными для мониторинга в условиях низкого полета. Эти средства могут дополнять существующие технологии, обеспечивая дополнительный уровень защиты и повышая общую надежность системы обнаружения. Кроме того, акустические средства имеют свои преимущества. Они могут работать в условиях ограниченной видимости и не зависят от внешних источников света. Это делает их идеальными, для охраны площадных объектов и объектов с низким уровнем внешнего шума, таких как склады, промышленные зоны и др., где другие технологии могут быть менее эффективными. В таких местах сигналы акустических шумов различных типов БЛА могут быть легче различимы на фоне минимального фоновых шума, что позволяет более точно и быстро реагировать на потенциальные угрозы. Интеграция акустических систем в комплексную систему мониторинга БЛА не только усиливает защиту этих объектов, но и создает многоуровневую систему безопасности, которая может эффективно функционировать в различных условиях.

В этом контексте разработка и совершенствование акустических средств разведки становятся ключевыми аспектами, поскольку они позволяют эффективно обнаруживать БЛА по характерным акустическим шумам. Анализ структуры сигналов акустических шумов и учет ключевых параметров, таких как частота, амплитуда и флуктуации, могут существенно улучшить качество обнаружения БЛА. Более того, на основе этих данных можно разработать эффективные алгоритмы и структуры устройств для обнаружения БЛА, что повысит общую надежность систем мониторинга. Таким образом, глубокое понимание акустических характеристик БЛА является важным шагом к созданию более совершенных технологий для их выявления и отслеживания. В этой связи диссертация А.Д.Пузанова является очень актуальной и представляет несомненный практический интерес.

3. Степень новизны результатов, полученных в диссертации и научных положений, которые выносятся на защиту

Новыми научными результатами полученными в диссертации являются:
– разработанная математическая модель временной структуры сигнала акустического шума БЛА на выходе акустического микрофона, представляющая сигнал акустического шума БЛА в виде суммы флуктуирующих последовательностей импульсов треугольной формы, пропорциональных звуковому давлению, создаваемому винтами БЛА, учитывающая характеристики направленности и параметров акустических микрофонов, флуктуации сигналов акустических шумов, траекторию полета БЛА, количество и характеристики винтов БЛА, позволяющая снизить среднюю ошибку аппроксимации энергетического спектра сигнала

акустического шума БЛА, а также сформировать импульсную характеристику оптимального фильтра, который повышает отношение сигнал/шум на его выходе по сравнению с существующими аналогами.

– разработанный алгоритм и структура квазиоптимального устройства для обнаружения БЛА по акустическим шумам, которые обеспечивают оптимальную фильтрацию сигнала акустического шума БЛА в интервале, определяемом временем корреляции флуктуаций этого сигнала, использующие многоканальный подход с учетом априорно-неизвестного периода повторения импульсов сигнала акустического шума БЛА в двухканальном устройстве выделения полезного сигнала, при этом импульсные характеристики каналов сдвинуты на четверть периода повторения принимаемых импульсов, что позволяет избежать потерь, связанных с априорно-неизвестным временем прихода сигнала акустического шума БЛА, увеличить дальность его обнаружения и обеспечить вероятность правильного обнаружения не менее 0,8.

4. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность полученных результатов, а также **обоснованность** выводов и рекомендаций подтверждаются проведением строгих математических расчетов, а также математического моделирования, проверенных в пакете прикладных программ Matlab, и натурных экспериментов с использованием разработанного макета акустической системы пассивной локации БЛА «Спрут», наличием актов практической реализации. Сделанные выводы достаточно обоснованы, непосредственно следуют из текста представленной рукописи диссертации.

5. Научная, практическая, экономическая и социальная значимость результатов диссертации с указанием рекомендаций по их использованию

Научная значимость диссертационных исследований заключается в усовершенствовании и развитии теории акустической локации малоразмерных БЛА за счет внедрения новой математической модели временной структуры сигнала акустического шума БЛА, а также разработки алгоритмов и структуры устройства для их обнаружения по акустическим шумам. Применение этих результатов позволяет эффективно решать задачи проектирования акустических устройств и акустической локации малоразмерных БЛА, особенно в условиях, когда традиционные радиолокаторы, оптические системы и пассивные радиотехнические средства сталкиваются с ограничениями.

Диссертационные исследования имеют высокую **практическую значимость**, обусловленную применением разработанного алгоритма и структуры квазиоптимального устройства обнаружения БЛА по акустическим шумам при разработке и проектировании современных

перспективных акустических систем пассивной локации БЛА. Это подтверждается применением результатов диссертационных исследований при испытании макета акустической системы пассивной локации «Спрут» и разработке макета системы противодействия БЛА «Тишина», построенного на базе комплексирования радиотехнических оптических и акустических средств разведки, о чем говорят акты реализации и справки о возможном практическом использовании.

Экономическая и социальная значимость диссертации заключается в потенциале достижения экономического эффекта через разработку и внедрение акустических систем для противодействия малоразмерным БЛА, а также за счет модернизации уже существующих комплексных систем противодействия. Кроме того, полученные результаты способствуют снижению материального ущерба, который могут причинить современные малоразмерные БЛА.

6. Опубликованность результатов диссертации в научной печати

Анализ опубликованных в научной печати работ А.Д. Пузанова свидетельствует о том, что основные научные результаты диссертации содержатся в 10 печатных работах, в том числе в 5 статьях в научных журналах, входящих в перечень ВАК, 5 статьях в сборниках материалов и тезисов докладов конференций.

7. Соответствие оформления диссертации требованиям Высшей аттестационной комиссии

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям Инструкции о порядке оформления диссертации, диссертации в виде научного доклада, автореферата диссертации и публикаций по теме диссертаций, утвержденной Постановлением ВАК Республики Беларусь от 28.02.2021 г. № 3 (в редакции от 22.08.2022 г. № 5). Разделы «Общая характеристика работы» и «Заключение» автореферата дословно воспроизводят соответствующие разделы диссертации без изъятий и дополнений. Содержание автореферата полностью соответствует положениям и выводам, изложенным в диссертации.

8. Замечания по диссертации

Несмотря на достаточный научный уровень, несомненную новизну и практическую полезность, работа не лишена недостатков. К наиболее существенным из них следует отнести следующие:

1. В работе не были подробно исследованы аспекты функционирования разработанного алгоритма и квазиоптимального устройства обнаружения в различных условиях помеховой обстановки. Отсутствие такого анализа может привести к недостаточной оценке их эффективности и надежности в реальных ситуациях, где действуют различные источники помех, сигналоподобные помехи и другие факторы, способные влиять на качество

обнаружения. Важно учитывать, что в таких условиях алгоритм может столкнуться с серьезными трудностями в обработке информации и принятии решений, что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в данной области.

2. В работе квазиоптимального устройства используется фиксированный порог обнаружения вместо адаптивного, что является менее эффективным решением, поскольку не учитывает современные тенденции в цифровой обработке сигналов. Адаптивные методы позволяют динамически подстраивать параметры под изменяющиеся условия, такие как фоновый шум и помехи, что значительно повышает точность и надежность обнаружения. В отличие от этого, фиксированный порог не способен реагировать на вариации в среде, что может привести к снижению качества обработки сигналов.

3. При разработке квазиоптимального алгоритма и устройства обнаружения автор сосредоточился исключительно на когерентном накоплении, не рассмотрев возможность последующей некогерентной обработки. Однако, некогерентная обработка может предложить значительные преимущества, особенно в условиях изменяющегося фона и помех. Она позволяет более эффективно использовать информацию о сигнале, не требуя строгой синхронизации с фазой, что делает ее более устойчивой к вариациям в условиях приема. Включение некогерентной обработки в алгоритм могло бы повысить его универсальность и адаптивность, улучшая общую производительность системы в реальных условиях эксплуатации что подчеркивает необходимость дальнейших исследований в данной области.

Приведённые недостатки не снижают общее положительное впечатление о работе, и не влияют на суть положений, выносимых на защиту, а также на научную и практическую ценность полученных результатов. Часть из приведенных замечаний может рассматриваться как направление дальнейших исследований.

9. Соответствие научной квалификации соискателя ученой степени

Диссертационная работа А.Д.Пузанова содержит новые научно-обоснованные результаты, использование которых обеспечивает решение важных прикладных задач и отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Текст диссертации и автореферата изложены на высоком техническом уровне. Соискатель обладает умением постановки научных задач в области радиотехники, применяет и использует современные математические методы для их решения.

Практические результаты, представленные в диссертации, подтверждают, что А.Д.Пузанов владеет пакетом прикладных программ Matlab, а также средой разработки программного обеспечения Visual Studio. Также автор имеет высокие практические навыки реального проектирования сложных радиотехнических систем, что подтверждается разработкой действующего макета акустической системы пассивной локации «Спрут»,

о чем имеются соответствующие справки и акты о возможном использовании результатов диссертационных исследований.

Изложенные факты и полученные соискателем новые научные результаты свидетельствуют – научная квалификация А.Д.Пузанова, соответствует учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

10. Заключение

Диссертация Пузанова Александра Денисовича «Обнаружение малоразмерных беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам», выполненная под научным руководством кандидата технических наук, доцента Нефёдова Д.С., является актуальной и законченной научной работой, имеет высокую научную и практическую значимость.

Содержание диссертационной работы соответствует отрасли технических наук, паспорту специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

Цель диссертации достигнута, задачи выполнены, а соискатель заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук за новые научно обоснованные результаты теоретических и прикладных исследований, обеспечивающих решение актуальной научной задачи – повышение эффективности обнаружения малоразмерных БЛА по акустическим шумам, включающие:

- математическую модель временной структуры сигнала акустического шума БЛА на выходе акустического микрофона, *отличающуюся* представлением сигнала акустического шума БЛА в виде суммы флуктуирующих последовательностей импульсов треугольной формы, пропорциональных звуковому давлению, создаваемому винтами БЛА, учетом характеристики направленности и параметров акустических микрофонов, флуктуаций сигналов акустических шумов, траектории полета БЛА, количества и характеристик винтов БЛА, *позволяющую* снизить среднюю ошибку аппроксимации энергетического спектра сигнала акустического шума БЛА на 7–30% по сравнению с известным аналогом;

- алгоритм и структуру устройства обнаружения БЛА по акустическим шумам, *отличающихся* оптимальной фильтрацией сигнала акустического шума БЛА на интервале, определяемом временем корреляции флуктуаций сигнала акустического шума БЛА, *многоканальностью* по априорно-неизвестному периоду повторения импульсов сигнала акустического шума БЛА в двухканальном устройстве выделения полезного сигнала, импульсные характеристики каналов которого сдвинуты на четверть периода повторения принимаемых импульсов, что *позволило* исключить потери, вызванные априорно-неизвестным временем прихода сигнала акустического шума БЛА, и *увеличить* дальность обнаружения БЛА не менее, чем в 1,3–1,6 раза, по сравнению с известными зарубежными акустическими системами «Ctr+Sky», «SKYSENTRY» для условной вероятности

правильного обнаружения не ниже 0,8 при условной вероятности ложной тревоги 10^{-4} .

Официальный оппонент:
начальник кафедры тактики
и вооружения радиотехнических
войск факультета противовоздушной
обороны учреждения образования
«Военная академия Республики
Беларусь»,
кандидат технических наук, доцент

П.В.Бойкачёв

06.05.2025

Начальник отдела кадров учреждения
образования «Военная академия
Республики Беларусь»

полковник В.В.Чербин

