

Государственное учреждение
«Научно-исследовательский институт Вооруженных сил Республики Беларусь»

УДК 534.442.5

ПУЗАНОВ
Александр Денисович

**ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

Минск 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь».

Научный руководитель

Нефёдов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь».

Официальные оппоненты:

Козлов Сергей Вячеславович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Бойкачёв Павел Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры тактики и вооружения радиотехнических войск факультета противовоздушной обороны учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация

общество с ограниченной ответственностью «ИнноТех Солюшнс»

Защита состоится «29» мая 2025 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций СД 04.02.01 при государственном учреждении «Научно-исследовательский институт Вооруженных сил Республики Беларусь» по адресу: 220103, г. Минск, ул. Славинского, 4/3, ауд. 113, e-mail: niivs@mod.mil.by, тел: 396 30 55 (доп. 52 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного учреждения «Научно-исследовательский институт Вооруженных сил Республики Беларусь».

Автореферат разослан «17» апреля 2025 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



А.В.Шуляк

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) нашли широкое применение в различных сферах деятельности человека, активно применяются для незаконных действий, а также ведения вооруженного противоборства. Малоразмерные БЛА являются относительно новым классом целей для обнаружения, обладающим относительно низкой заметностью для современных средств противодействия, первичным этапом работы которых является обнаружение. С учетом ограниченных возможностей средств разведки, для обнаружения БЛА целесообразно использовать различные физические принципы, что позволяет нивелировать слабые стороны каждого средства в отдельности и повышать эффективность противодействия БЛА [3-А; 5-А].

Для обнаружения малоразмерных БЛА наибольшее распространение получили радиотехнические, радиолокационные и оптико-электронные средства. Влияние подстилающей поверхности, неоднородность фона, малые геометрические размеры, низкая скорость полета БЛА, движение в режиме радиомолчания ограничивают эффективность перечисленных средств обнаружения. Особенно уязвимой для данных средств является область малых дальностей до 300 м, что обусловлено, в первую очередь, большими угловыми скоростями перемещения БЛА и интенсивными отражениями от местных предметов [3-А].

Расширить возможности системы противодействия БЛА, особенно на предельно малых высотах и малых дальностях, позволяет включение в ее состав акустической системы обнаружения. Акустические системы могут функционировать в сложной электромагнитной обстановке, отсутствии видимости, работают в пассивном режиме и имеют относительно низкую стоимость [3-А-7-А; 9-А; 10-А].

Анализ показывает, что количество самостоятельных акустических систем разведки, а также систем противодействия БЛА, обладающих акустическим каналом обнаружения, с каждым годом растет. Необходимо отметить высокий экспортный потенциал акустических средств обнаружения, при фактически полном отсутствии опыта их разработки в Республике Беларусь [5-А].

Несмотря на бурное развитие, реализуемые на практике дальности обнаружения БЛА по акустическим шумам (АШ) не превышают 80...200 м, что не является потенциально достижимым результатом [1-А; 4-А-6-А]. Сказанное определяет высокую актуальность исследований вопросов акустической заметности БЛА и их обнаружения по создаваемым акустическим шумам (АШ).

Диссертационная работа посвящена рассмотрению однопозиционных обнаружителей БЛА. Основное внимание в работе уделяется разработке математической модели, описывающей сигнал АШ БЛА, которая позволяет синтезировать оптимальные (квазиоптимальные) алгоритмы и устройства обнаружения, обладающие более высокой эффективностью по сравнению с существующими аналогами [1-А; 3-А-5-А].

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации включена в утвержденные планы научной работы учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» и соответствует Перечню перспективных направлений диссертационных исследований в Вооруженных Силах Республики Беларусь, в области синтеза, анализа и оптимизации процессов обнаружения, распознавания, разрешения сигналов (помех), измерения их параметров в пассивных оптико-электронных, акустических, сейсмических, электростатических системах обнаружения наземных и воздушных объектов (п. 3.2) раздела 3.

Результаты исследований, представленные в диссертации, использованы при выполнении следующих научно-исследовательских работ:

1. «Оценка возможности применения акустических систем разведки наземных и воздушных целей. Технический облик акустической системы обнаружения БЛА», выполненной в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» в 2020/2021 г, (рег. № 529256);

2. «Разработка макета акустической системы обнаружения БЛА», выполненной в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» в 2021/2022 г, (рег. № 593526);

3. «Обоснование облика модульной системы противодействия малогабаритным БЛА», выполненной в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь» в 2021/2022 г, (рег. № 529576);

4. «Разработка облика автоматического комплекса разведки и подавления радиоканалов БЛА (квадрокоптерного типа) на основе комплексирования их акустических, оптических и радиотехнических демаскирующих признаков» (№ госрегистрации 20231521).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель – повышение эффективности обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на предельно малых высотах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– проведен аналитический обзор существующих акустических систем обнаружения БЛА, в состав которых входит акустический канал приема с определением возможных путей совершенствования таких систем;

– выполнены экспериментальные исследования с регистрацией сигналов акустических шумов малоразмерных БЛА различных типов с последующей оценкой их спектрально-временных структур и автокорреляционных функций;

– разработана математическая модель временной структуры сигнала акустического шума БЛА на выходе акустического микрофона, и проведен ее

сопоставительный анализ с существующими аналогами и результатами экспериментальных исследований;

- синтезирована импульсная характеристика оптимального фильтра сигнала акустического шума БЛА при априорно известных его координатах и параметрах;

- проведен статистический синтез оптимальных (квазиоптимальных) алгоритмов обработки сигналов для обнаружения БЛА по акустическим шумам, выполнена оценка показателей качества их функционирования;

- разработан макет акустической системы пассивной локации БЛА, реализующий квазиоптимальный алгоритм обработки сигналов для обнаружения БЛА по акустическим шумам;

- проведены экспериментальные исследования по обнаружению БЛА с использованием макета акустической системы пассивной локации, а также сопоставительный анализ результатов математического моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Объект исследования – система обнаружения беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам.

Предмет исследования – спектрально-временные структуры, автокорреляционные функции сигналов акустических шумов БЛА, алгоритмы функционирования и показатели эффективности устройства обнаружения БЛА по акустическим шумам.

Научная новизна

Научная новизна полученных результатов заключается в:

1. Разработке математической модели временной структуры сигнала акустического шума БЛА на выходе акустического микрофона, отличающейся 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, что позволило снизить среднюю ошибку аппроксимации энергетического спектра сигнала акустического шума БЛА при априорно известных координатах и параметрах летательного аппарата – дальности, азимута, угла места, количества лопастей, винтов, углов рысканья тангажа и крена.

2. Разработке алгоритма и структуры 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.

Положения, выносимые на защиту:

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

2. Алгоритм и структура устройства обнаружения БЛА по акустическим шумам, *отличающиеся* 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} .

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Все основные результаты диссертационных исследований получены соискателем лично. Основным соавтором публикаций является научный

руководитель – кандидат технических наук, доцент Нефёдов Денис Сергеевич, который определял цели, ставил задачи исследований, принимал участие в выборе методов исследований и обсуждении полученных результатов. Вклад другого соавтора в совместно опубликованных работах – кандидата технических наук, доцента Сахарука Д.А., заключается в организации разработки макета акустической системы обнаружения БЛА по акустическим шумам.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались на: Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использовании технологий двойного назначения «MILEX.INNOVATIONS – 2019» (г. Минск, 2019); Международной военно-научной конференции «Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях» УО «ВА РБ» (г. Минск, 2019); I Республиканском семинаре «Проблемные вопросы и перспективы создания пассивных средств обнаружения маловысотных летательных аппаратов» УО «ВА РБ» (г. Минск, 2020); Республиканской научно-практической конференции «Применение беспилотных авиационных комплексов в интересах ВВС и войск ПВО. Защита объектов от БЛА» (г. Минск, 2019); Международной научно-практической конференции «Безопасность в условиях трансформации угроз: актуальные проблемы и решения» ГУО «Институт национальной безопасности Республики Беларусь» (г. Минск, 2021).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты научных исследований по теме диссертации опубликованы в 10 печатных работах: 5 статьях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (2,4 авторских листа), 5 тезисах докладов и материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, перечня сокращений и условных обозначений, общей характеристики работы, основной части, состоящей из четырех глав, заключения, библиографического списка и одного приложения. Список использованных источников включает библиографический список из 111 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 10 наименований. Общий объем – 119 страниц, в том числе 52 рисунка на 24 страницах, 21 таблица на 6 страницах, 1 приложение на 13 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи исследований.

В **первой главе** диссертации проведен анализ особенностей акустического обнаружения БЛА, акустических систем обнаружения, а также принципов построения и направлений совершенствования таких систем.

В результате анализа характеристик существующих акустических систем обнаружения (таблица 1) установлено, что реализуемые на практике дальности обнаружения значительно уступают потенциально достижимой [5–А, 6–А].

Таблица 1 – Дальность обнаружения БЛА акустическими системами

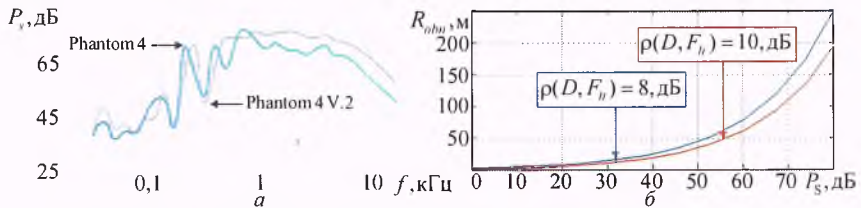
Наименование системы	Страна производства	Дальность обнаружения БЛА типа «DJI Phantom», м
Ctr+Sky, Skycentry	Польша, Нидерланды	200
General Atomic Fencepost	США	150
Dronetracker, Oriella; Drone Hunter	Германия; Испания	80; 100

Потенциальная дальность обнаружения БЛА по АШ рассчитывалась согласно выражению:

$$R_{obn} = r_o \sqrt{\frac{P_s \nu_{kn}}{4\pi L_h \rho(D, F_h)}} \quad (1)$$

где L_h – уровень внутреннего шума АМ, Па; P_s – звуковое давление АШ БЛА, Па; ν_{kn} – эффективность устройства обработки, раз; $\rho(D, F_h)$ – отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе устройства обработки, требуемое для обеспечения заданной вероятности правильного обнаружения D при фиксированной вероятности ложной тревоги F_h , раз; r_o – опорное расстояние ($r_o = 1$), м.

Результаты оценки потенциальной дальности обнаружения согласно выражению (1), представлены на рисунке 1.



а – зависимости уровня сигнала АШ БЛА от частоты звука; б – зависимости дальности обнаружения от уровня сигнала АШ, создаваемого винтами БЛА типа DJI Phantom 4

Рисунок 1 – Теоретическая оценка дальности обнаружения БЛА по АШ

Даже при отсутствии в устройстве обнаружения специальных алгоритмов частотной селекции $\nu_{kn} = 1$, создаваемый уровень шума БЛА (рисунок 1, а) позволяет обнаруживать его на дальностях порядка 150...200 м (рисунок 1, б). Очевидно, что, применяя специальные алгоритмы пространственной селекции и

выделения сигналов АШ БЛА на фоне других шумов (повышая показатель $\nu_{\text{кп}}$), указанные дальности обнаружения могут быть увеличены [6–А].

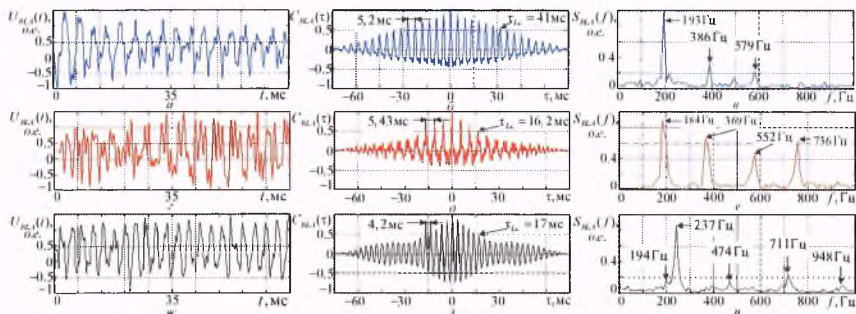
Проведен обзор известных алгоритмов обнаружения БЛА по АШ, среди которых наибольшее распространение получили такие алгоритмы как «Zero crossing rate», «MelFrequency Cepstral Coefficients», нейросетевые алгоритмы и машинное обучение, а также различного рода оценки спектральных коэффициентов, определяемых по дискретной реализации принятого сигнала АШ БЛА путем использования быстрого и дискретного преобразований Фурье. Реализуемые дальности обнаружения БЛА известных алгоритмов составляют 50–150 м, что не является пределом возможностей обнаружения БЛА по АШ [5–А].

В качестве целесообразных направлений развития акустической системы обнаружения определены:

1. Разработка и совершенствование алгоритмов однопозиционного обнаружения;
2. Разработка систем акустического обнаружения на базе адаптивных антенных решеток.

Приоритет в диссертации отдан первому направлению ввиду большой разницы между реализуемыми и потенциальными дальностями обнаружения БЛА, что обусловлено отсутствием эффективных алгоритмов селекции сигналов АШ БЛА на фоне других шумов [5–А].

Во **второй главе** диссертации на основании проведенных экспериментальных исследований разработана ММ временной структуры (ВС) сигнала АШ БЛА на выходе АМ. Объектами экспериментальных исследований являлись различные типы БЛА. Исследования проводились в различных режимах полета БЛА [2–А]. Основные полученные результаты представлены на рисунке 2.



- а, б, в – временная структура, АКФ, ЭС сигнала АШ БЛА самолетного типа (Supercam S350);
 г, д, е – временная структура, АКФ, ЭС сигнала АШ БЛА DJI Phantom 4 Pro (режим висения);
 ж, з, и – временная структура, АКФ, ЭС сигнала АШ БЛА DJI Phantom 4 Pro (режим полета)

Рисунок 2 – Основные результаты экспериментальных исследований

В результате исследований установлено (рисунок 2) [2–А, 4–А]:

1. Временная структура сигнала АШ БЛА (рисунок 2, а, г, ж) может быть представлена последовательностью импульсов треугольной формы, пропорциональных звуковому давлению.

2. Ввиду нестационарности частоты вращения винтов БЛА, импульсы звукового давления сигнала АШ подвержены флуктуациям (рисунок 2, а, г, ж), что приводит к увеличению ширины зубца ЭС сигнала АШ БЛА (рисунок 2, в, е, и). Флуктуации обусловлены случайным перемещением БЛА на траектории полета, вибрацией лопастей, влиянием на ЛА внешних факторов (порывы ветра, погодные условия и т.п.), а также работой системы стабилизации.

3. Энергетический спектр сигнала АШ БЛА имеет гребенчатую структуру (рисунок 2, в, е, и). Положение гармоник периодического ЭС на оси частот определяется произведением числа оборотов вала электродвигателя в секунду на число лопастей винта БЛА и частотой Доплера. Ширина гармоник ЭС сигнала АШ БЛА для различных типов БЛА принимает значения 10...40 Гц и обратно пропорциональна удвоенному времени корреляции флуктуаций, равному 13...50 мс, автокорреляционные функции (АКФ) рисунка 2, б, д, з.

В результате проведенных исследований сигналов АШ БЛА различных типов, анализа публикаций, посвященных математическому описанию временных и частотных структур акустических сигналов различной природы происхождения, разработана ММ ВС сигнала АШ БЛА на выходе АМ в виде суммы флуктуирующих последовательностей импульсов треугольной формы, пропорциональных звуковому давлению, создаваемому винтами БЛА [1–А–5–А]:

$$U_{BLA}(t, N_V, N_L, \theta, \phi, \psi, \varphi, \vartheta, r_{BLA}) = F(\theta, \phi) \sum_{i=1}^{N_V} \left\{ \sum_{j=1}^{N_L} P_{Vi}(t, N_L, \phi, r_{BLA}) \times \right. \\ \left. \times U_L \left[t - t_{zi}(\psi, \varphi, \vartheta, r_{BLA}) - (j-1)T_{PVi}(t) \right] \right\} \quad (2)$$

где $F(\theta, \phi)$ – значение характеристики направленности (ХН) АМ в направлении θ, ϕ , В/Па; θ, ϕ – азимут и угол места БЛА относительно положения АМ, град; $P_{Vi}(t, N_L, \phi, r_{BLA})$ – случайная амплитуда звукового давления АШ i -го винта БЛА, Па; $i = \overline{1, N_V}$; $j = \overline{1, N_L}$; N_V – количество винтов БЛА; N_L – количество лопастей винта БЛА; r_{BLA} – расстояние между БЛА и АМ, м; U_L – закон изменения сигнала АШ одного оборота винта БЛА; ψ, φ, ϑ – угол рысканья, тангажа и крена БЛА соответственно, град; $t_{zi}(\psi, \varphi, \vartheta, r_{BLA})$ – относительное время задержки прихода АШ i -го винта БЛА, с; $T_{PVi}(t)$ – случайный период повторения импульсов звукового давления, создаваемых i -м винтом БЛА, с.

Разработанная ММ (1), отличается от известных учетом [1–А, 5–А]:

1. Характеристики направленности и параметров АМ (сомножитель $F(\theta, \phi)$).
2. Пространственного положения и перемещения БЛА относительно точки наблюдения (сомножители $P_{Vi}(t, N_L, \phi, r_{BLA})$ и $t_{zi}(\psi, \varphi, \vartheta, r_{BLA})$).
3. Количества винтов БЛА (сомножитель N_V).

4. Направленных свойств акустического излучения винтов БЛА (сомножитель $P_{v_i}(t, N_L, \phi, r_{BLA})$).

5. Флуктуаций сигнала АШ БЛА (сомножители $P_{v_i}(t, N_L, \phi, r_{BLA})$ и $T_{P_{v_i}}(t)$).

Результаты оценки средней ошибки аппроксимации (COA) экспериментально полученных ЭС сигнала АШ БЛА с разработанной ММ (1) и известной моделью представлены в таблице 2 [5–А].

Таблица 2 – Результаты оценки средней ошибки аппроксимации ЭС АШ БЛА

Тип БЛА	Режим полета	Значение COA ЭС сигнала АШ БЛА		$(\delta_a - \delta_{rmm}), \%$
		Известная ММ, $\delta_a, \%$	Разработанная ММ, $\delta_{rmm}, \%$	
Supercam S350	Прямолинейный	10	3	7
DJI Phantom	Прямолинейный	35	5	30
	Висение	20	7	13

Пример ЭС сигнала АШ БЛА, иллюстрирующего отличия ММ (1) от известной и наглядно демонстрирующий ее соответствие экспериментальным данным, представлен на рисунке 3 [5–А].

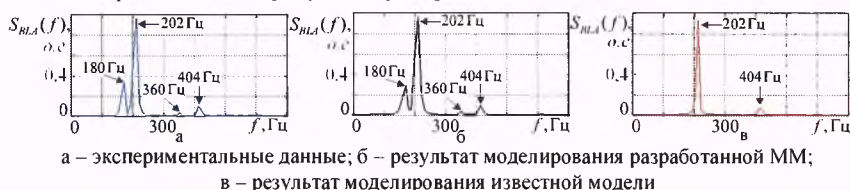
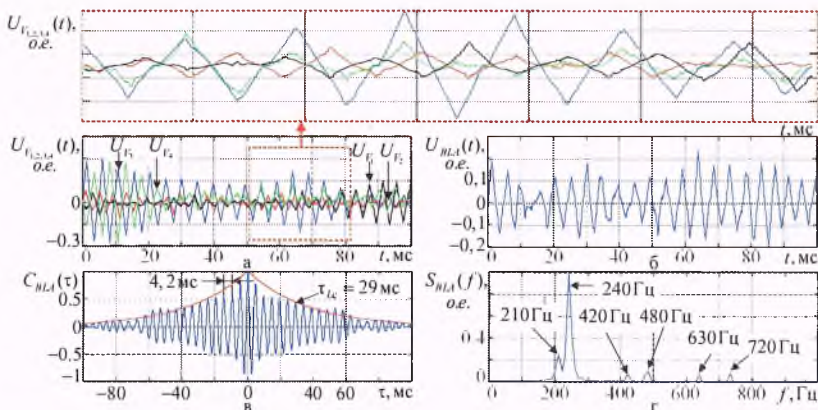


Рисунок 3 – Энергетический спектр сигнала АШ БЛА DJI Phantom 4

Результаты моделирования спектрально-временных структур и АКФ сигналов АШ БЛА с использованием ММ (1) представлены на рисунке 4.



а – ВС сигнала АШ создаваемого i -м винтом БЛА; б – ВС суммарного сигнала АШ создаваемого винтами БЛА; в – АКФ сигнала АШ БЛА; г – ЭС сигнала АШ БЛА

Рисунок 4 – Результаты моделирования сигнала АШ БЛА DJI Phantom 4

В результате исследований установлено, что совокупный учет факторов, отличающих ММ (1) от известной модели, позволяет уменьшить СОА ЭС сигнала АШ БЛА на **7–30 %** относительно экспериментально полученных результатов, что в рассматриваемом примере (рисунок 4) выражается наличием гармоники от второй пары винтов, вращающихся с меньшей скоростью, а также согласованностью ширины зубца ЭС сигнала АШ БЛА с экспериментальными данными [5–А].

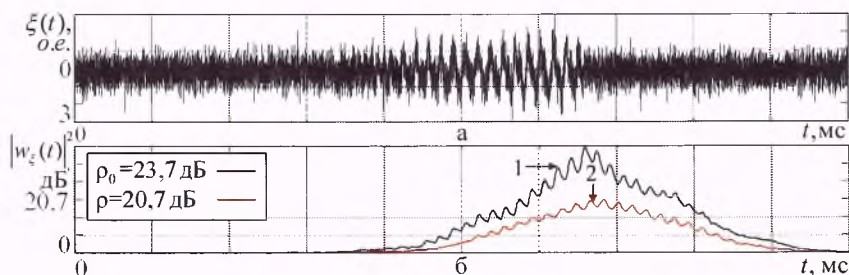
Разработанная ММ (1) позволяет синтезировать импульсную характеристику (ИХ) оптимального фильтра (ОФ) сигнала АШ БЛА при априорно известных координатах и параметрах ЛА – дальность, азимут, угол места, количество лопастей, винтов, угол рысканья, тангажа и крена. Критерием синтеза, является получение максимума энергетического ОСШ на выходе фильтра [5–А].

Прирост в эффективности выделения сигнала АШ БЛА с использованием ОФ характеризуется выигрышем в ОСШ ($\rho_0 - \rho$), где ρ_0 , ρ – ОСШ на выходе ОФ и фильтра аналога. Усредненные результаты оценки значений ОСШ для различных режимов полета и типа БЛА с использованием ОФ и фильтра аналога сведены в таблицу 3. Для достижения заданной точности оцениваемых результатов проведено 272 модельных опыта по оценке ОСШ [5–А].

Таблица 3 – Результаты оценки ОСШ

Тип БЛА	Режим полета	Среднее значение ОСШ на выходе фильтра		Выигрыш в ОСШ
		Фильтр аналог ρ , дБ	ОФ ρ_0 , дБ	
Supercam S350	Прямолинейный	23,7	25,2	1,5
DJI Phantom	Прямолинейный	17	20	3
	Висение	16	18	2

В качестве примера на рисунке 5 представлены временные структуры сигнала АШ БЛА DJI Phantom 4 в режиме висения на входе $\xi(t)$, и выходе фильтра $|w_\xi(t)|^2$ при входном ОСШ равном 1 дБ [5–А].



а – ВС принятого сигнала АШ БЛА; б – ВС сигнала на выходе ОФ (1) и фильтра аналога (2)

Рисунок 5 – Результаты фильтрации сигнала АШ БЛА DJI Phantom 4

Таким образом, использование ОФ позволяет увеличить ОСШ на его выходе на **1,5...3 дБ** по сравнению с известным аналогом [5–А].

В **третьей главе** диссертации произведен синтез оптимального алгоритма обнаружения сигнала АШ БЛА по критерию Неймана-Пирсона. Поскольку

значение периода повторения T_{pv} импульсов звукового давления принятого сигнала АШ БЛА априорно не известно, осуществлен переход от оптимального алгоритма обнаружения к квазиоптимальному алгоритму, многоканальному по периоду повторения импульсов звукового давления сигнала АШ БЛА (частоте вращения винтов БЛА с учетом частоты Доплера). Диапазон значений периодов повторения каналов обработки должен перекрывать диапазон возможных частот вращения винтов БЛА, составляющий 150...500 Гц [2–А, 4–А].

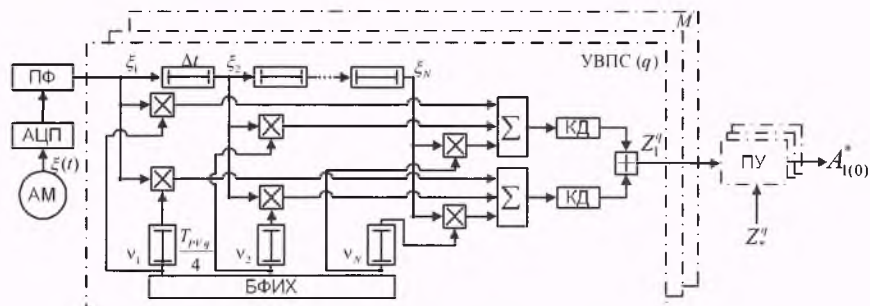
Разработанный алгоритм обнаружения описывается выражением [4–А]:

$$Z^q = \left| \sum_{n=1}^N \xi_n v_n^{T_{pvq}} \right|^2, \quad q = \overline{1, M}, \quad (3)$$

где: q – номер канала обработки; M – количество каналов обработки многоканального устройства выделения полезного сигнала (УВПС); ξ_n – n -й дискретный отсчет принятой реализации сигнала АШ БЛА; $n = \overline{1, N}$; $v_n^{T_{pvq}}$ – дискретные отсчеты ИХ ОФ q -го канала обработки, настроенного на конкретное значение периода повторения T_{pvq} сигнала АШ БЛА; $N = T_N / \Delta t$ – количество отсчетов принятого сигнала за время наблюдения T_N ; Δt – интервал дискретизации.

Время прихода сигнала АШ БЛА априорно-неизвестно, что также может привести к потерям в ОСШ. Для исключения данных потерь с учетом периодичности сигнала каждое УВПС включает два идентичных канала обработки, ИХ которых сдвинуты относительно друг друга на время, соответствующее четверти периода повторения $T_{pvq}/4$, что аналогично реализации двух квадратурных каналов устройств выделения радиочастотных колебаний [4–А].

Структурная схема квазиоптимального устройства обнаружения сигнала АШ БЛА представлена на рисунке 6 [4–А].



АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ПФ – полосовой фильтр; БФИХ – блок формирования ИХ ОФ; КД – квадратичный детектор; ПУ – пороговое устройство
Рисунок 6 – Структурная схема разработанного устройства обнаружения БЛА по АШ

Принятый АМ сигнал преобразуется в дискретные отсчеты и поступает на ПФ, в котором происходит выделение априорно-неизвестной полосы рабочих частот сигнала АШ БЛА с учетом частоты Доплера [2–А]. Сигнал с выхода ПФ обрабатывается в многоканальном УВПС. В каждом канале данного устройства реализовано два канала, в которых вычисляется свертка дискретных отсчетов принятого сигнала на выходе ПФ с дискретными отсчетами ИХ ОФ, настроенной на конкретное значение периода повторения T_{PVq} ожидаемого сигнала АШ БЛА. Количество отсчетов ИХ ОФ определяется интервалом дискретизации и удвоенным временем корреляции флуктуаций сигнала АШ БЛА, значение которого определено экспериментально. Результаты свертки с выходов квадратурных каналов после квадратичного детектирования суммируются и подаются на ПУ.

В ПУ происходит формирование фиксированного порога обнаружения Z_0^q по критерию Неймана-Пирсона для заданной вероятности ложной тревоги F_h согласно выражению:

$$Z_0^q = -\overline{Z_0^q} \ln(F_h) \quad (4)$$

где $\overline{Z_0^q}$ – среднее значение помеховой составляющей, величина которой рассчитывается в q -м канале обработки, при отсутствии сигнала АШ БЛА.

В случае превышения порога хотя бы в одном ПУ формируется решение об обнаружении БЛА [4–А].

Необходимое количество каналов обработки многоканального УВПС с учетом требуемого диапазона перекрытия априорно-неизвестного периода повторения импульсов (частот сигнала АШ БЛА с учетом частоты Доплера) и значений рассогласования по периоду повторения Δt_{PV} определяется выражением:

$$M = \left\lceil (T_{PV \max} - T_{PV \min}) / \Delta t_{PV} \right\rceil, \quad (5)$$

где: $T_{PV \max}, T_{PV \min}$ – максимально и минимально возможные периоды повторения импульсов сигнала АШ БЛА.

Значение рассогласования Δt_{PV} между соседними каналами обработки многоканального УВПС определяется заданным допустимым снижением дальности обнаружения $\Delta R_{обм}$ по сравнению с оптимальным приемом. Полученные результаты расчета требуемого количества каналов обработки многоканального УВПС представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Требуемое количество каналов обработки многоканального УВПС

Параметр	$T_{PV \max}$, мс	$T_{PV \min}$, мс	$2\tau_{I_k}$, мс	$ \Delta t_{PV} $, мкс	$\Delta R_{обм}$, %	M , ед
Значение	6,6	2	100, 66, 50, 33	22, 32, 48, 68	10	209, 144, 96, 68
				17, 23, 35, 48	5	270, 200, 131, 96
				8, 11, 18, 23	1	575, 418, 256, 200

Выбор целесообразного количества каналов обработки M определяется на этапе проектирования акустической системы, исходя из аппаратных возможностей вычислительных средств и требований по быстродействию.

Оптимизация количества каналов обработки M с учетом времени корреляции флуктуаций сигнала АШ БЛА τ_c может помочь достичь баланса между вычислительной нагрузкой и эффективностью обнаружения. Выбор квазиоптимального времени корреляции позволяет инженеру адаптировать систему под конкретные условия эксплуатации и типы БЛА, что может привести к улучшению ОСШ и, как следствие, к повышению эффективности обнаружения БЛА при минимальных потерях в дальности.

В четвертой главе диссертации произведена оценка эффективности разработанного алгоритма и квазиоптимального с двумя квадратурными каналами устройства обнаружения БЛА по АШ.

Разработанное устройство и алгоритм обнаружения были реализованы в экспериментальном макете акустической системы пассивной локации (АСПЛ) БЛА «Спрут», который разработан в Военной академии Республики Беларусь.

Основные характеристики оборудования макета и реализованного в нем квазиоптимального устройства обнаружения представлены в таблице 5 [4–А].

Таблица 5 – Характеристики макета АСПЛ

Наименование оборудования	Основные характеристики
Акустические микрофоны конденсаторного типа Rode NTG 5	осевая чувствительность – 66 мВ/Па;
	вид ХН – кардиоида;
	уровень собственного шума – 10 дБ;
	ОСШ – 84 дБ.
Звуковая карта Focusrite Scarlett 2i2 gen	частота дискретизации – 44100 Гц;
	разрядность АЦП – 24 бит;
ПЭВМ «Getac» В300 с установленным специальным программным обеспечением	процессор – Intel Core i5 (1,9...4,2) ГГц;
	размер оперативной памяти – 6 Гб
Параметры квазиоптимального устройства обнаружения	
Диапазон рабочих частот, Гц	150...500
Время наблюдения цели $T_N = T_{kn}$, мс	100
Количество каналов УВПС, M , ед	209
Рассогласование между каналами, Гц	1,7
Вероятность ложной тревоги	10^{-4}

Экспериментальные исследования по обнаружению БЛА по АШ проводились в полевых условиях, где имитировалась охрана площадного стационарного объекта. В ходе экспериментальных исследований оценивались дальности обнаружения следующих типов БЛА [4–А]:

1. Класса «Micro» (квадрокоптеры «DJI Phantom 4 Pro», «DJI Mavic 2»);
2. Класса «Micro» самолетного типа производства Республики Беларусь;
3. Класса «Mini» (квадрокоптер «DJI Matrice 300 RTK», квадрокоптер производства Республики Беларусь).

По результатам проведенных экспериментальных исследований установлено, что дальности обнаружения БЛА с вероятностью не ниже 0,8, при значении условной вероятности ложной тревоги 10^{-4} составили [4–А]:

1. Для БЛА класса «Micro» квадрокоптерного типа – 270...320 м;
2. Для БЛА класса «Micro» самолетного типа – 350...380 м;
3. Для БЛА класса «Mini» квадрокоптерного типа – 520...890 м.

Полученные с использованием макета АСПЛ дальности обнаружения не менее чем в 1,3...1,6 раза превосходят заявленные дальности обнаружения БЛА по АШ известными зарубежными системами: «Ctr+Sky» – 200 м; «DEDRONE» – 80 м; «Oriella» – 100 м; «SKYSENTRY» – 200 м, что подтверждает эффективность разработанного квазиоптимального алгоритма и квазиоптимального с двумя каналами устройства обнаружения БЛА по АШ [4–А].

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертации и рекомендации по их практическому применению.

В приложении А представлены акты о практическом использовании результатов диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведен обзор существующих акустических систем обнаружения и систем противодействия БЛА, в состав которых входит акустический канал обнаружения, в результате которого установлено, что доля акустических средств разведки БЛА постоянно увеличивается. При высоком экспортном потенциале акустических средств, опыта их разработки в Республике Беларусь фактически нет. Ввиду большой разницы между реализуемыми и потенциальными дальностями обнаружения БЛА по акустическим шумам, что обусловлено отсутствием эффективных алгоритмов селекции сигналов акустических шумов БЛА на фоне других шумов, наиболее целесообразным направлением развития акустической системы обнаружения определена разработка и совершенствование алгоритмов однопозиционного обнаружения [5–А].

2. Проведены экспериментальные исследования с регистрацией сигналов акустических шумов БЛА различных типов с последующей оценкой их спектрально-временных структур и автокорреляционных функций, в результате которых установлено, что наибольший вклад в общий уровень акустического шума БЛА вносят винты [1–А; 2–А; 6–А].

Временная структура сигнала акустического шума БЛА может быть представлена суммой флуктуирующих последовательностей импульсов треугольной формы, пропорциональных звуковому давлению, создаваемому винтами БЛА. Флуктуации обусловлены случайной траекторией полета БЛА, изменением его ракурса относительно точки наблюдения, вибрацией лопастей, влиянием на БЛА внешних факторов (порывов ветра, погодных условий и т.п.), а также работой системы стабилизации, что приводит к нестационарности частоты вращения винтов. Энергетический спектр сигнала акустического шума БЛА имеет гребенчатую структуру. Положение гармоник периодического ЭС на оси частот определяется произведением числа оборотов вала ЭД в секунду на число лопастей винта БЛА. Ширина гармоник ЭС сигнала акустического шума БЛА для

различных типов БЛА может принимать значения 10...40 Гц и обратно пропорциональна удвоенному времени корреляции флуктуаций, равному 13...50 мс [2–А; 4–А].

3. Разработана модель временной структуры сигнала акустического шума БЛА на выходе акустического микрофона в виде суммы флуктуирующих последовательностей импульсов треугольной формы, пропорциональных звуковому давлению, создаваемому винтами БЛА. По сравнению с известными, модель учитывает: характеристики направленности и параметры акустических микрофонов; пространственное положение и перемещение БЛА относительно точки наблюдения; количество винтов и направленные свойства их акустического излучения; флуктуации акустических шумов. Совокупный учет перечисленных факторов и треугольная аппроксимация импульсов сигнала акустического шума БЛА позволили снизить среднюю ошибку аппроксимации ЭС сигнала акустического шума БЛА на 7–30 % при априорно известных координатах и параметрах БЛА – дальность, азимут, угол места, количество лопастей, винтов, угол рысканья, тангажа и крена [1–А; 5–А].

4. Синтезирована ИХ оптимального фильтра сигнала акустического шума БЛА при априорно известных координатах и параметрах БЛА. Критерием синтеза является получение максимума энергетического ОСШ на выходе фильтра. Применение ОФ с полученной ИХ позволяет повысить эффективность выделения сигнала акустического шума БЛА на фоне других шумов, что характеризуется увеличением ОСШ на выходе фильтра на 1,5...3 дБ по сравнению с известным аналогом [5–А].

5. Синтезирован оптимальный алгоритм обнаружения БЛА по акустическим шумам. Полезный сигнал выделяется УВПС, реализующим свертку дискретных отсчетов, принятых акустических шумов с отсчетами ИХ ОФ на интервале, равном удвоенному времени корреляции флуктуаций сигнала акустического шума БЛА. Ввиду априорно-неизвестных значений скорости полета БЛА, периода повторения импульсов сигнала АШ БЛА (количества оборотов винта (винтов), лопастей) сигнала акустического шума БЛА, осуществлен переход от оптимального алгоритма обработки к квазиоптимальному. В квазиоптимальном алгоритме обработки УВПС является многоканальным по априорно-неизвестному периоду повторения ожидаемого сигнала акустического шума БЛА (частоте вращения винтов БЛА с учетом частоты Доплера). Диапазон значений периодов повторения каналов обработки перекрывает полосу возможных частот вращения винтов БЛА, составляющую 150...500 Гц [2–А; 4–А].

6. Разработана структура квазиоптимального устройства обнаружения БЛА по акустическим шумам. Количество каналов обработки устройства рассчитывается по критерию заданного допустимого снижения дальности обнаружения по сравнению с оптимальным приемом, с учетом возможного значения времени корреляции флуктуаций сигналов акустических шумов различных типов БЛА, значение которых получены экспериментально. Для исключения потерь, вызванных неизвестным временем прихода сигнала АШ

БЛА (времени прихода импульсов звукового давления АШ БЛА в точку размещения АМ), УВПС включает два канала, ИХ которых сдвинуты относительно друг друга на четверть периода повторения [4–А].

7. Разработан макет акустической системы пассивной локации, в котором реализовано разработанное квазиоптимальное устройство обнаружения и проведены экспериментальные исследования обнаружения БЛА по акустическим шумам. По результатам проведенных исследований установлено, что дальности обнаружения БЛА с вероятностью не ниже 0,8 при значении условной вероятности ложной тревоги 10^{-4} составили: БЛА класса «Micro» самолетного типа – 350...380 м; БЛА класса «Micro» квадрокоптерного типа – 270...320 м; БЛА класса «Mini» квадрокоптерного типа – 520...890 м. Полученные с использованием макета АСПЛ дальности обнаружения превосходят не менее чем в 1,3...1,6 раза заявленные дальности обнаружения БЛА известными зарубежными системами: «Cтр+Sky» – 200 м; «SKYSENTRY» – 200 м, что подтверждает эффективность разработанного квазиоптимального алгоритма и квазиоптимального с двумя каналами устройства обнаружения БЛА по АШ [4–А; 8–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанная ММ временной структуры сигнала АШ БЛА может использоваться для разработки алгоритмов и устройств совместного обнаружения-распознавания, измерения координат БЛА по АШ, с последующей оценкой их эффективности, а также при обосновании требований к акустической заметности проектируемых БЛА.

2. Полученные алгоритмы функционирования и квазиоптимальное устройство обнаружения могут использоваться при разработке перспективной акустической системы обнаружения БЛА по АШ, применение которой возможно, как в составе комплексной системы противодействия, так и в качестве системы мониторинга воздушного пространства (охраны важных площадных стационарных важных объектов).

Дальнейшее развитие тематики диссертационного исследования может заключаться в проектировании акустической антенной решетки с целью повышения дальности обнаружения БЛА и реализации алгоритмов пространственной компенсации внешних акустических помех.

Соискатель

А.Д. Пузанов

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Пузанов, А.Д. Математическая модель временной структуры акустического шума беспилотного летательного аппарата / А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов // Научно-теоретическое дополнении к журналу «Армия» «Наука и. военная безопасность». – 2020. – №1. – С. 32–36.

2–А. Пузанов, А.Д. Результаты экспериментальных исследований спектрально-временных характеристик акустических шумов беспилотных летательных аппаратов. / А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов // Научно-теоретическое дополнении к журналу «Армия» «Наука и военная безопасность». – 2020. – №4. – С.19–24.

3–А. Пузанов, А.Д. Синтез алгоритма обнаружения маловысотных беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам /А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов // Доклады БГУИР. – 2021. – №2. – С. 65-73.

4–А. Пузанов, А.Д. Результаты экспериментальных исследований по обнаружению беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам / А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов, Д.А. Сахарук // Научно-теоретическое дополнении к журналу «Армия» «Наука и военная безопасность». – 2021. – №4. – С. 24–30.

5–А. Пузанов, А.Д. Синтез оптимального фильтра сигнала акустического шума беспилотного летательного аппарата при априорно известных его координатах и параметрах / А.Д. Пузанов // Научно-теоретическое дополнении к журналу «Армия» «Наука и военная безопасность». – 2023. – №4. – С. 34–39.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6–А. Пузанов, А.Д. Оценка дальности обнаружения БЛА акустической системой пассивной локации. / АД. Пузанов, Д.С. Нефедов // 8-я Международная научная конференция по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения: сб. науч. ст., Минск, 16–17 мая 2019 г.: в 5 ч. /Гос. воен. пром. ком. Респ. Беларусь. – Минск, 2019. – Ч. 2. – С. 63–66.

7–А. Пузанов, А.Д. Защита государственной границы от воздушных провокаций, контрабанды и террористических угроз. / А.Д. Пузанов, В.В. Курилович // Безопасность в условиях трансформации угроз: актуальные проблемы и решения: материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 ноября 2021 г.: в 3 т. /Ин-т нац. безопасности Респ. Беларусь; редкол.: Г.Г. Краско (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021 – Т.1. – С. 83–86.

8–А. Пузанов, А.Д. Результаты экспериментальных исследований по обнаружению беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам / А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов // Актуальные вопросы развития систем автоматизи, радиолокации и приемо-передающих устройств: материалы Респ. науч.-практ. семинара каф. автоматизи, радиолокации и приемо-

передающих устройств Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 28 окт. 2021 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2022. – С. 67–71.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

9–А. Пузанов, А.Д. Экспериментальные исследования звукового портрета беспилотного летательного аппарата. / А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов // Применение беспилотных авиационных комплексов в интересах ВВС и войск ПВО. Защита объектов беспилотных летательных аппаратов: тез. докл. Науч. практ. конф. ком. ВВС и ПВО. Респ. Беларусь, – Минск, 2019. – С. 217–220.

10–А. Пузанов, А.Д. Обнаружение маловысотных беспилотных летательных аппаратов по акустическим портретам / А.Д. Пузанов, Д.С. Нефёдов // Проблемные вопросы и перспективы создания пассивных систем обнаружения воздушных объектов: тез. докл. Науч. сем. Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск, 29 сент. 2020 г. / Воен. акад. Респ. Беларусь. – Минск, 2020. – С 43–49.

РЭЗЮМЭ

Пузанаў Аляксандр Дзянісавіч

Выяўленне малапамерных беспілотных лятальных апаратаў па акустычных шумах

Ключавыя словы: спектральна-часавыя характарыстыкі акустычных шумоў беспілотных лятальных апаратаў, квазіаптымальная прылада выяўлення, эксперыментальныя даследаванні па выяўленні беспілотных лятальных апаратаў па акустычных шумах.

Мэта дысертацыйнага даследавання: павышэнне эфектыўнасці выяўлення малапамерных беспілотных лятальных апаратаў на гранічна малых вышынях.

Метады даследавання: метады эксперыментальных даследаванняў, метады статыстычнай тэорыі прыняцця рашэнняў, а таксама метады матэматычнага мадэлявання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: праведзены параўнальны аналіз існуючых акустычных і комплексных сістэм выяўлення БЛА у склад якіх уваходзіць акустычны канал прыёму, вызначаны асноўныя падыходы да павышэння рэалізуемай далёкасці выяўлення БЛА па акустычных шумах. Выраблены аналітычны агляд публікацый прысвечаных распрацоўцы матэматычных мадэляў, а таксама алгарытмаў выяўлення БЛА, вызначаны іх асноўныя недахопы. Распрацавана матэматычная мадэль часовай структуры акустычнага шуму БЛА на выхадзе акустычнага мікрафона, з улікам недахопаў існуючых мадэляў. Для аналізу спектральна-часавых характарыстык акустычных шумоў створаных БЛА розных тыпаў і асноўных характарыстык перашкоды, якая ствараецца ветрам, а таксама з мэтай верыфікацыі, распрацаванай матэматычнай мадэлі, зроблены эксперыментальныя даследаванні. Распрацаваны квазіаптымальны алгарытм выяўлення БЛА па АШ згодна з якім сінтэзавана квазіаптымальная прылада выяўлення БЛА па АШ. На заключным этапе, спланаваны і праведзены эксперыментальныя даследаванні па выяўленні БЛА розных тыпаў, з выкарыстаннем распрацаванага макета акустычнай сістэмы пасіўнай лакацыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры распрацоўцы перспектыўнай акустычнай сістэмы выяўлення малапамерных БЛА па акустычных шумах, якія ажыццяўляюць палёт на малых і лімітава малых вышынях.

Галіна прымянення: мадэрнізацыя комплексных сістэм выяўлення малапамерных БЛА, а таксама стварэнне перспектыўных пасіўных, акустычных сістэм маніторынгу паветранай прасторы (аховы плошчавых аб'ектаў, дзяржаўных межаў).

РЕЗЮМЕ

Пузанов Александр Денисович

ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ

Ключевые слова: спектрально-временные структуры сигналов акустических шумов беспилотных летательных аппаратов, квазиоптимальное устройство обнаружения, экспериментальные исследования по обнаружению беспилотных летательных аппаратов по акустическим шумам.

Цель работы: повышение эффективности обнаружения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов на предельно малых высотах.

Методы исследования и использованная аппаратура: методы экспериментальных исследований, методы статистической теории принятия решений, а также методы математического моделирования.

Полученные результаты и их новизна: проведен сравнительный анализ существующих акустических и комплексных систем обнаружения БЛА в состав которых входит акустический канал приема, определены основные подходы к повышению реализуемой дальности обнаружения БЛА по акустическим шумам. Произведен аналитический обзор публикаций, посвященных разработке математических моделей, а также алгоритмов обнаружения БЛА, определены их основные недостатки. Разработана математическая модель временной структуры сигнала акустического шума БЛА на выходе акустического микрофона, с учетом недостатков моделей аналогов. Для анализа спектрально-временных структур сигналов акустических шумов, создаваемых БЛА различных типов, а также с целью верификации разработанной математической модели, произведены экспериментальные исследования. Синтезирован квазиоптимальный алгоритм обнаружения БЛА по АШ и разработано квазиоптимальное устройство обнаружения БЛА по АШ. На заключительном этапе спланированы и проведены экспериментальные исследования по обнаружению БЛА различных типов с использованием разработанного макета акустической системы пассивной локации.

Рекомендации по использованию: результаты исследования могут быть использованы при разработке перспективной акустической системы обнаружения БЛА по акустическим шумам.

Область применения: модернизация комплексных систем обнаружения малоразмерных БЛА, а также создание перспективных пассивных, акустических систем мониторинга воздушного пространства (охраны площадных объектов).

SUMMARY

Puzanau Aliaksandr

Detection of small unmanned aircraft by acoustic noise

Key words: spectral-temporal characteristics of acoustic noise of unmanned aerial vehicles, quasi-optimal detection device, experimental studies on the detection of unmanned aerial vehicles by acoustic noise.

Research purpose: improving the detection efficiency of small unmanned aerial vehicles at extremely low altitudes.

Research methods: methods of experimental research, methods of statistical decision-making theory, as well as methods of mathematical modeling.

Obtained results and their novelty: a comparative analysis of existing acoustic and integrated systems for detecting unmanned aerial vehicles, which include an acoustic receiving channel, was carried out, the main approaches to increasing the realizable detection range of unmanned aerial vehicles by acoustic noise were determined. An analytical review of publications devoted to the development of mathematical models, as well as algorithms for the detection of unmanned aerial vehicles, was made, their main shortcomings were identified. A mathematical model of the temporal structure of the acoustic noise of an unmanned aerial vehicle at the output of an acoustic microphone has been developed, taking into account the shortcomings of existing models. To analyze the spectral-temporal characteristics of acoustic noise generated by unmanned aerial vehicles of various types and the main characteristics of the interference generated by the wind, as well as to verify the developed mathematical model, experimental studies were carried out. A quasi-optimal algorithm for detecting unmanned aerial vehicles by acoustic noise has been developed, according to which a quasi-optimal device for detecting unmanned aerial vehicles by acoustic noise has been synthesized. At the final stage, experimental studies were planned and carried out to detect unmanned aerial vehicles of various types, using the developed layout of the passive location acoustic system.

Usage recommendations: the results of the study can be used in the development of a promising acoustic detection system for small-sized unmanned aerial vehicles based on acoustic noise flying at low and extremely low altitudes.

Application: modernization of integrated detection systems for small unmanned aerial vehicles, as well as the creation of advanced passive, acoustic airspace monitoring systems (protection of areal facilities, state borders).

Научное издание

ПУЗАНОВ
Александр Денисович

**ОБНАРУЖЕНИЕ МАЛОРАЗМЕРНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО АКУСТИЧЕСКИМ ШУМАМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

Подписано в печать 10.04.2025. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,28. Тираж 50 экз. Заказ 29.

Полиграфическое исполнение:

учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий

№ 2/81 от 19.03.2014.

Пр. Независимости, 220, 220057, Минск.