

На правах рукописи



Воробьев Евгений Николаевич

**РАСПОЗНАВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ В ПАССИВНОМ
КОГЕРЕНТНОМ ЛОКАТОРЕ**

Специальность:

2.2.16 – Радиолокация и радионавигация

(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт- Петербург – 2022

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Научный руководитель:

Веремьёв Владимир Иванович, кандидат технических наук, директор Научно-исследовательского института систем прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций (НИИ «Прогноз») ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ», профессор кафедры радиотехнических систем ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Официальные оппоненты:

Мякиньюков Александр Валерьевич, доктор технических наук, доцент, директор Учебно-научного института радиоэлектроники и информационных технологий Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород

Макаренко Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, доцент Центра подготовки кадров высшей квалификации АО «НПП «Радар ММС», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «7» июня 2022 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета 24.2.387.01 в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» по адресу: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах докторских и кандидатских диссертаций».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197022, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, литера Ф.

Автореферат диссертации разослан «6» апреля 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.387.01
кандидат технических наук



М.Е. Шевченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В последние годы увеличивается активность коммерческой и частной легкомоторной авиации - растет количество малых воздушных судов, таких как вертолеты, легкомоторные самолеты и, как следствие, число связанных с ними авиационных происшествий. Наиболее часто происшествия происходят именно с участием легкомоторной авиации.

Угрозу для воздушного движения также представляют беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Общедоступность и относительная простота управления БПЛА приводит, как и в случае с легкомоторными ЛА, к проблеме контроля несанкционированных полетов и обеспечения безопасности воздушного движения в приземном пространстве. Кроме того, ряд свойств БПЛА представляет угрозу их использования в террористических целях. Способность БПЛА к интенсивно маневрирующему полету с полезной нагрузкой на малых высотах позволяет обеспечить скрытую доставку оружия к густонаселенным центрам, местам массового скопления людей, стратегически и политически важным объектам государственного управления или обеспечения жизнедеятельности (объекты инфраструктуры, энергетики и др.).

Круглосуточный, всепогодный оперативный контроль воздушного пространства позволяют обеспечить современные средства радиолокационного мониторинга. Сформулированные вызовы и угрозы обеспечению безопасности полетов гражданской авиации требуют применения средств маловысотной радиолокации. Причем находиться они должны на густонаселенных территориях и в местах расположения стратегически важных объектов.

Эффективным решением для мониторинга воздушного пространства является использование средств пассивной когерентной радиолокации. Ключевой особенностью пассивного когерентного локатора (ПКЛ) является использование сторонних передатчиков в качестве источников радиолокационного подсвета. Сегодня ПКЛ главным образом используют для обнаружения, определения координат и сопровождения движущихся целей, в том числе воздушных, что делает их перспективным средством для использования в современных системах обеспечения безопасности и контроля воздушного движения. Однако, во многих случаях для оценки степени потенциальной угрозы необходимо не только обнаружить воздушную цель, но и распознать, т.е. принять решение о принадлежности обнаруженной цели к определенному классу. Задача распознавания воздушных целей в ПКЛ на сегодняшний день является актуальной.

Цели и задачи. Целью диссертационной работы является разработка и исследование методов распознавания воздушных целей в пассивном когерентном локаторе, использующем сигналы передатчиков цифрового эфирного телевидения в качестве радиолокационного подсвета.

Для достижения поставленной цели в работе решаются **следующие задачи:**

1. Анализ и выбор информативных признаков распознавания воздушных целей с учетом возможности их оценки в пассивных когерентных радиолокационных системах со сторонним подсветом от передатчиков цифрового эфирного телевидения.

2. Разработка математической модели сигнала, отраженного от вращающихся лопастей винтомоторных летательных аппаратов при бистатической геометрии взаимного расположения приемной позиции, цели и источника подсвета.

3. Разработка и исследование метода распознавания воздушных целей различных классов в радиолокационных системах со сторонним подсветом.

4. Разработка, реализация и экспериментальные исследования алгоритма оценки информативных признаков распознавания воздушных целей по спектральному портрету в ПКЛ.

5. Экспериментальные исследования сигналов, отраженных от воздушных целей со схожими информативными признаками распознавания.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель, которая позволяет описать сигналы, отраженные от вращающихся лопастей винтомоторных целей с различной конфигурацией и параметрами винтов двигательной установки в бистатической РЛС.

2. Разработан оригинальный метод распознавания воздушных целей по совокупности траекторных и сигнальных признаков в пассивном когерентном локаторе со сторонним подсветом от передатчиков цифрового эфирного телевидения.

3. Разработан алгоритм обработки информации в пассивном когерентном локаторе для оценки параметров вращения лопастей двигательной установки винтомоторных целей по спектральному портрету отраженных от целей сигналов.

4. Экспериментально исследованы частотная и временная структура сигналов, отраженных от трудноразличимых воздушных целей со схожими информативными признаками распознавания.

Практическая значимость. Практическая значимость результатов работы заключается в разработке метода распознавания воздушных целей по спектральному портрету и алгоритма оценки параметров вращения лопастей винтов винтомоторных ЛА. Предложенная математическая модель позволяет для РЛС с бистатической геометрией смоделировать сигналы, отраженные от вращающихся лопастей винтов с разной конфигурацией, пространственной ориентацией, размерами и частотой вращения. Данные, полученные с помощью моделирования, могут быть использованы для оперативной отладки и апробации алгоритмов при разработке систем автоматического распознавания целей для РЛС мониторинга воздушного пространства.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование совокупности траекторных и сигнальных информативных признаков, а именно значений скорости движения цели и периодов повторения модуляционных составляющих отраженного сигнала, обусловленных наличием вращающихся элементов конструкции, позволяет осуществлять эффективное распознавание воздушных целей различных классов в пассивном когерентном локаторе с сигналами подсвета передатчиков цифрового эфирного телевидения.

2. Использование математической модели сигнала, отраженного от системы вращающихся лопастей винтов, представленных набором точечных отражателей, расположенных вдоль отрезка с длиной, равной длине лопасти, позволяет

достоверно описать структуру сигналов, отраженных от винтомоторных ЛА с разной конфигурацией винтов и динамическими параметрами их вращения в бистатической РЛС, работающей в диапазоне частот цифрового эфирного телевидения.

3. Для оценки информативных сигнальных признаков распознавания винтомоторных ЛА в пассивном когерентном локаторе целесообразно использовать спектральный портрет пропеллерной модуляции, извлекаемый из взаимной функции неопределенности опорного сигнала и сигналов канала наблюдения.

Достоверность научных результатов. Достоверность и обоснованность полученных в работе научных результатов обуславливается корректным использованием методов исследования, экспериментальным подтверждением работоспособности предложенных методов и алгоритмов, соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований, применением современных вычислительных средств и прикладных программных пакетов.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

На международных конференциях: IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) – 2016-2018, 2021, Санкт-Петербург Россия; SPITSE Topical Workshop on Electromagnetics in Advanced Applications – 2017, Санкт-Петербург, Россия; International Conference “Системы Радиолокационного Мониторинга/Radar Monitoring Systems-2017” (RMS) – 2017, г. Ханой, Вьетнам; 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON) – 2018, г. Познань, Польша; 19th International Radar Symposium (IRS) – 2018, г. Бонн, Германия; 3rd Japan-Russia Joint Microwave Workshop – 2018, г. Санкт-Петербург, Россия; International Radar Symposium (RADAR) – 2019, г. Тулон, Франция; 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA) – 2020, Москва, Россия; Signal Processing Symposium (SPSympo) – 2019, г. Краков, Польша; 2021, г. Лодзь, Польша.

На региональных и всероссийских конференциях: 70-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2017, Санкт-Петербург; XLIX Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти авиаконструктора И.И. Сикорского – 2017, Санкт-Петербург; XVII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций» – 2018, Москва; Региональная молодежная научная конференция Будущее науки в Санкт-Петербурге – 2021, Санкт-Петербург.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 23 научных работах, среди которых 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 12 публикаций в изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 1 монография, 3 публикации в других изданиях, 5 свидетельств о регистрации программного обеспечения для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав с выводами, заключения, списка сокращений и обозначений, списка

литературы, включающего 75 наименований. Общий объем диссертации составляет 120 страниц машинописного текста. Работа содержит 65 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные принципы и этапы процесса радиолокационного распознавания; сформулированы задачи, решаемые в ходе распознавания. Рассмотрены различные информативные признаки, используемые при радиолокационном распознавании. Особое внимание отводится признакам, обусловленным явлением вторичной модуляции.

Проведен обзор существующих методов оценки информативных признаков и подходов к принятию решений при распознавании воздушных целей. Сформулированы требования к параметрам сигналов подсвета и характеристикам радиолокационных систем необходимых для использования того или иного метода распознавания. Показано, что многообразие возможных методов и решений при разработке систем радиолокационного распознавания определяется как характеристиками самих целей (параметрами движения, размерами, конструкцией), так и тактико-техническими параметрами РЛС. Сформулированы задачи исследований в рамках диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены основные принципы работы и технические характеристики пассивных когерентных локационных систем. В общем случае ПКЛ имеет бистатическую геометрию взаимного расположения приемной позиции, наблюдаемой цели, и источника сигнала подсвета (рисунок 1).

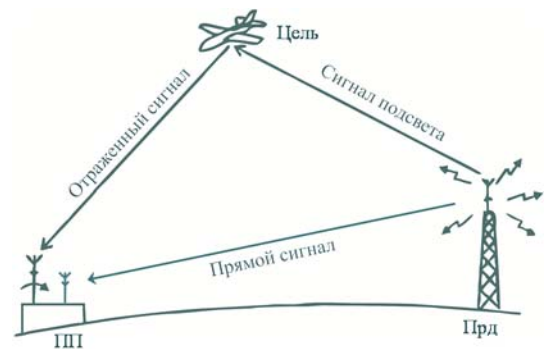


Рисунок 1 – Геометрия ПКЛ

Обработка сигналов в ПКЛ основана на вычислении и анализе взаимной функции неопределенности (ВФН) прямого $v(t)$ и отраженного целью $u(t)$ сигналов:

$$|\Psi(\tau, f_D)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) v^*(t - \tau) \exp(j2\pi f_D t) dt \right|^2,$$

где τ – задержка; f_D – доплеровский сдвиг частоты; t – время; символ «*» – комплексное сопряжение.

Проведен анализ характеристик и конструктивных особенностей воздушных целей, обнаруживаемых с помощью ПКЛ. В результате были выделены следующие классы наблюдаемых в ПКЛ целей: «самолет» (тяжелые и средние самолеты), «винтовой самолет» (легкомоторные), «вертолет», «БПЛА» и «птицы». Проведен анализ информативных признаков распознавания воздушных целей выделенных

классов, а также возможностей по их оценки в пассивном когерентном локаторе со сторонним подсветом от передатчиков цифрового эфирного телевидения (ЦЭТВ) стандарта DVB-T2. Частоты вещания сигналов ЦЭТВ лежат в диапазоне от 470 МГц до 790 МГц. Эффективная полоса частот сигнала составляет 7,61 МГц.

Разработан метод распознавания воздушных целей по совокупности траекторных и сигнальных признаков. Предложена обобщенная схема обработки сигналов в ПКЛ, включающая в себя этап распознавания (рисунок 2). Распознавание предлагается осуществлять после того, как цель обнаружена и взята на сопровождение.

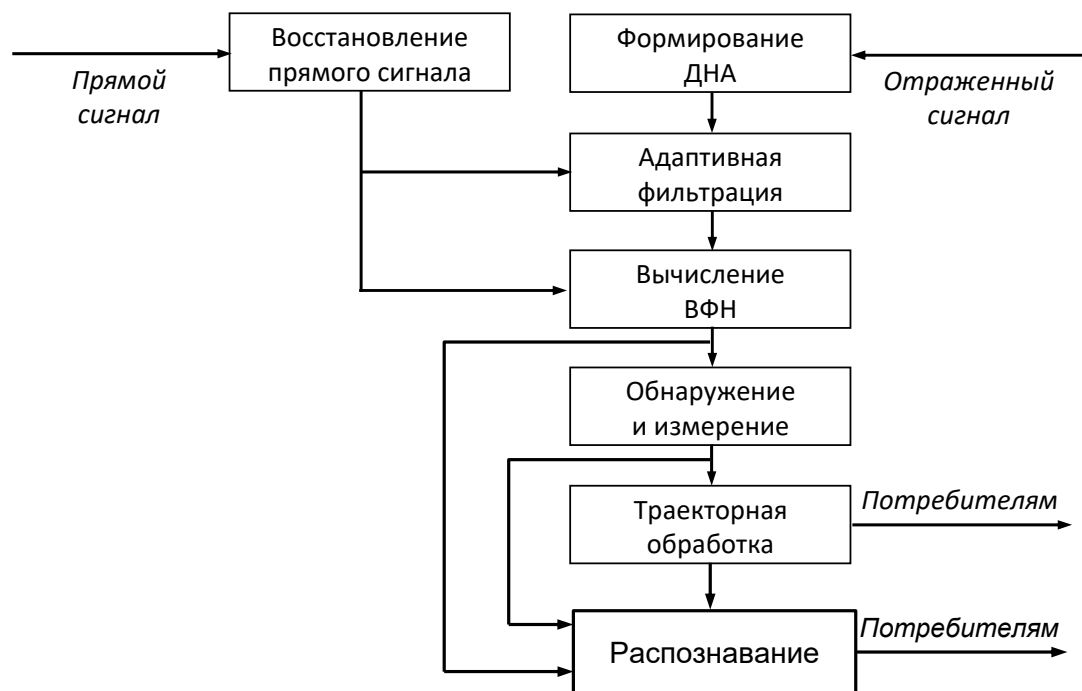


Рисунок 2 – Обобщенная схема обработки сигналов в ПКЛ

Входными данными блока распознавания является результат вычисления взаимной функции неопределенности (ВФН), результат пороговой обработки от обнаружителя и траекторные данные обнаруженной цели от блока траекторной обработки (рисунок 3). Блок распознавания включает в себя два этапа: распознавание по скорости и по сигнальным признакам.

В качестве траекторных признаков распознавания предложено использовать абсолютные значения скоростей целей. Использование скорости как информативного признака позволяет осуществить предварительное сужение пространства радиолокационного распознавания и выбор группы классов (в отдельных случаях - определения конкретного класса), к которым может принадлежать цель. Было показано, что используя значение скорости в качестве информативного признака можно однозначно принять решение о распознавании класса «самолет» либо сузить пространство распознавания до двух групп классов целей, диапазоны скоростей которых в крейсерском режиме полета пересекаются: первая группа - «винтовой самолет» и «вертолет», вторая – «вертолет», «БПЛА» и «птицы». При возникновении неоднозначности в принятии решения по траекторным признакам, дальнейший процесс распознавания с использованием сигнальных

признаков осуществляется относительно групп классов, сформированных по результатам работы по траекторным признакам.

Среди сигнальных признаков распознавания воздушных целей выделенных классов наиболее информативным является эффект вторичной модуляции отраженного целью сигнала. Вторичная модуляция возникает в результате отражений сигнала подсвета от вращающихся элементов двигательной установки ЛА. У целей рассматриваемых классов такими элементами являются лопасти винтов винтового самолета или несущих и рулевых винтов вертолета, лопасти пропеллеров БПЛА (пропеллерная модуляция).

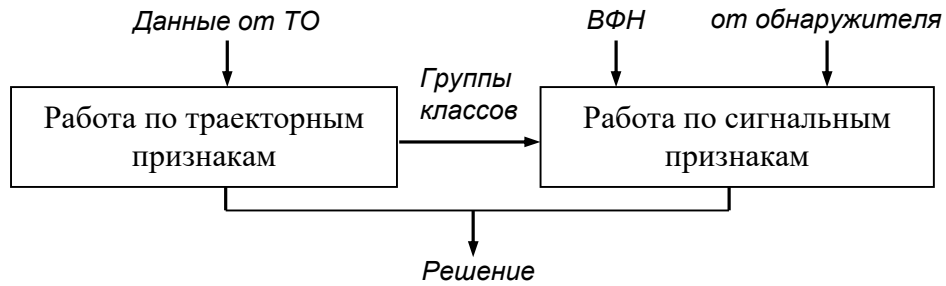


Рисунок 3 – Структура блока распознавания

Во временной области сигнал, отраженный от лопасти винта, вращающегося с частотой f_B , представляет собой последовательность периодических импульсов (модуляционных составляющих) с периодом повторения, равным периоду вращения лопасти $T_B = 1/f_B$ (рисунок 4). Если цель содержит систему из нескольких вращающихся лопастей, то структура отраженного сигнала представляет собой последовательность модуляционных составляющих (МС), обусловленных отражением от системы лопастей. Период повторения модуляционных составляющих суммарного отраженного сигнала для системы из N_D лопастей определяется выражением:

$$T_{МС} = \frac{T_B}{mN_D},$$

где $m = 1$ для четного числа лопастей, $m = 2$ – для нечетного.

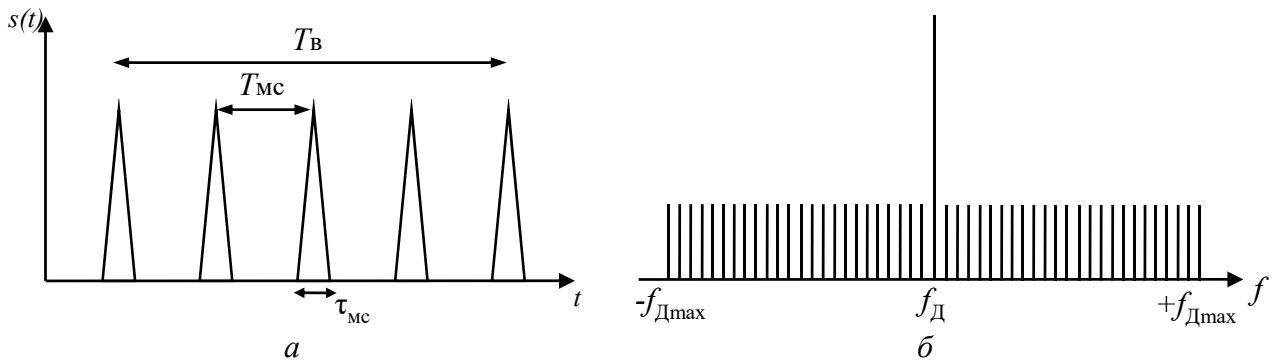


Рисунок 4 – Структура сигнала, отраженного от вращающейся лопасти, и его спектра

Соответствующий доплеровский спектр вторичной модуляции имеет также периодическую структуру в виде спектральных составляющих (рисунок 4, б), следующих с частотой повторения $\Delta f_{MC} = 1/T_{MC}$. Структура отраженного сигнала и его доплеровского спектра в этом случае определяется параметрами и конструкцией двигательной установки, а именно количеством лопастей, их геометрическими размерами и частотой вращения винтов.

В частотной и временной области проведен сравнительный анализ влияния пропеллерной модуляции на структуру отраженного сигнала от различных целей. Для этого предложена математическая модель описания сигналов, отраженных от вращающихся лопастей винтомоторных летательных аппаратов, при бистатической геометрии ПКЛ (рисунок 5).

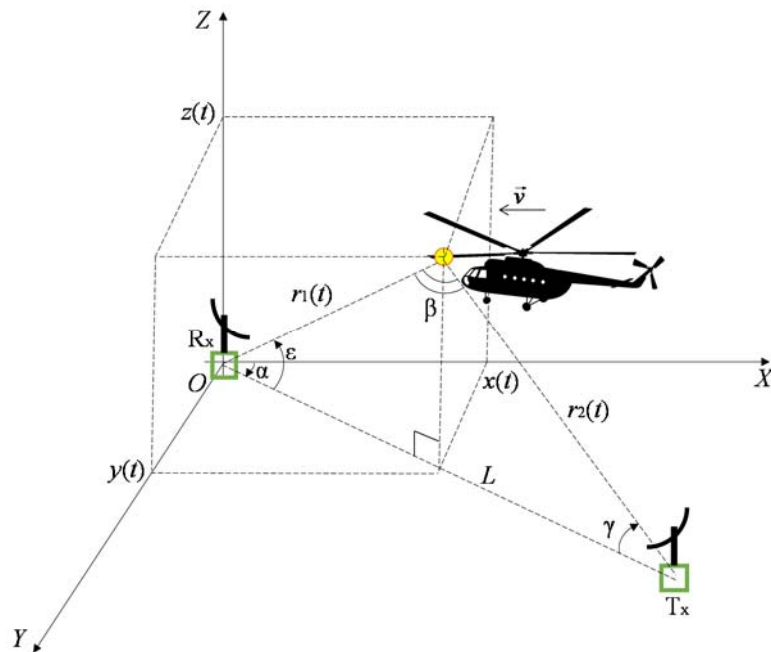


Рисунок 5

Каждая лопасть винта в модели представляется в виде набора точечных отражателей, расположенных вдоль отрезка с длиной, соответствующей длине лопасти. Сигнал, отраженный от системы лопастей, описывается суперпозицией сигналов, отраженных от отдельных отражателей на каждой лопасти:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^M E_{n,i}(t) \exp[i(\varphi_{n,i}(t))],$$

где $E_{n,i}(t)$ и $\varphi(t)$ – амплитуда и фаза сигнала, отраженного от i -го отражателя на n -й лопасти.

Математическая модель позволяет получить достоверное описание структуры сигналов, отраженных от винтомоторных ЛА различных классов. При моделировании использовались реальные значения частоты вращения, длины и числа лопастей винтов целей классов «вертолет» (Ми-8), «винтовой самолет» (Cessna 172) и «БПЛА» (квадрокоптер DJI Phantom 3), которые представлены в таблице 1. Также в таблице приведены расчетные значения периодов повторения модуляционных составляющих. Поступательное движение целей не учитывалось, т.е. при моделировании скорость движения цели была принята равной нулю.

Таблица 1

Параметр	Цель			
	Ми-8		Cessna 172	DJI Phantom 3
	НВ	РВ		
f_B , Гц	3,2	18,7	25	85...90
N_L	5	3	3	2×4
L , м	10,35	1,25	0,8	0,115
T_{MC} , мс	31,25	8,9	6,6	5,8

Полученные в результате моделирования спектры сигналов от вертолета, винтового самолета и малого БПЛА типа квадрокоптер, показаны на рисунке 6.

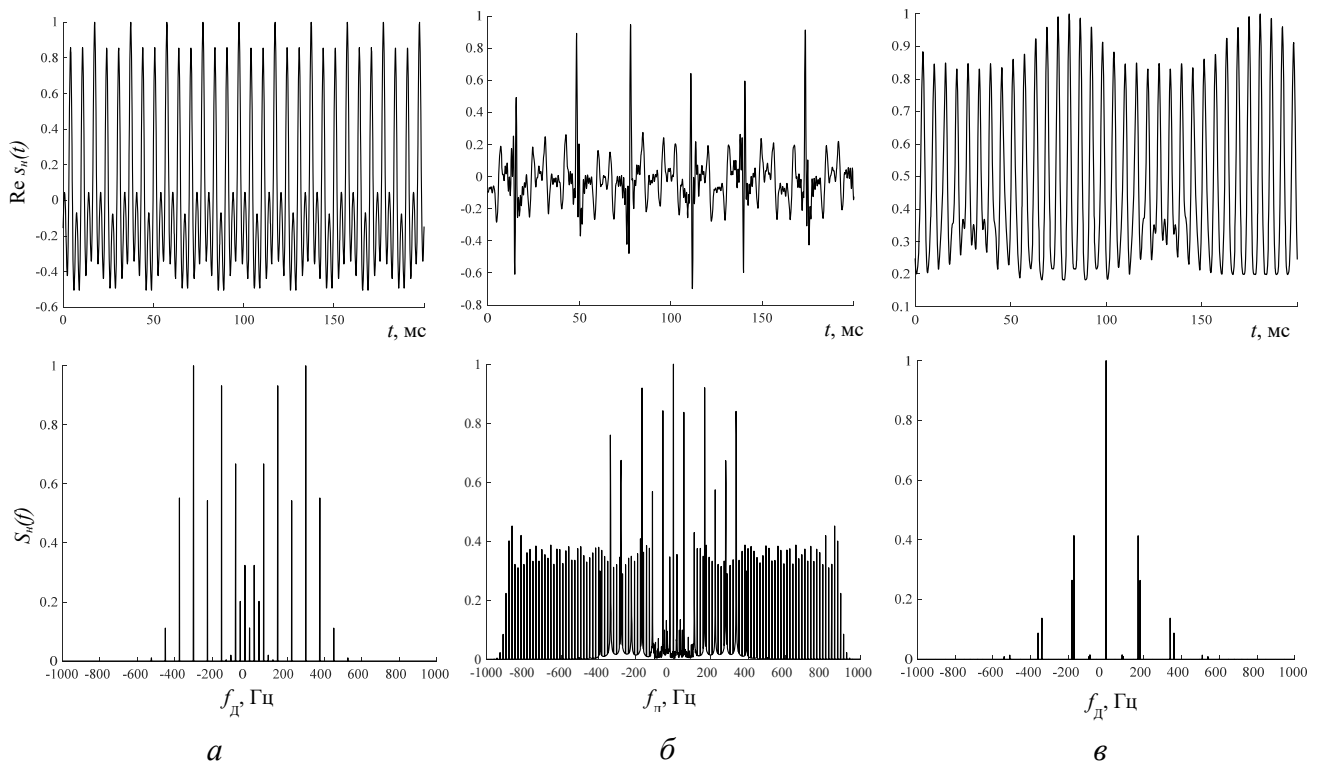


Рисунок 6 – Временная реализация и спектры сигналов, отраженных от а) винтового самолета, б) вертолета, в) квадрокоптера

У целей класса вертолет можно выделить две группы модуляционных составляющих с разной частотой повторения, обусловленных отражением сигнала подсвета от несущего (НВ) и рулевого винтов (РВ). Во временной области МС от НВ и РВ следуют отдельно друг от друга и представляется возможным оценить их периоды повторения. Модуляционные составляющие с меньшим периодом повторения (8,9 мс) соответствуют отражениям от РВ вертолета, с большим периодом повторения (31,25 мс) – отражениям от НВ вертолета. В частотной области МС от винтов могут накладываться друг на друга, но также можно оценить частоты повторения. В случае винтового самолета и в частотной, и во временной области наблюдается только одна группа периодических модуляционных составляющих. Сигнал, отраженный от БПЛА, имеет более сложную структуру из-за особенностей конструкции двигательной установки. Квадрокоптер имеет четыре винта, вращающихся попарно в противоположных направлениях. Частоты вращения всех

винтов лежат в одном диапазоне, что приводит к наложению и взаимному влиянию модуляционных составляющих от разных лопастей.

Проведены исследования влияния бистатической геометрии взаимного расположения приемной позиции ПКЛ, цели, и источника сигнала подсвета на структуру спектра сигнала. Результаты моделирования и лабораторных экспериментов в безэховой камере показали, что увеличение бистатического угла приводит к уменьшению ширины спектра пропеллерной модуляции.

Лабораторные исследования в безэховой камере также показали, что на структуру отраженного сигнала и его спектра существенно влияет материал лопастей. Так, для изготовления лопастей малых БПЛА часто используют пластик или углепластик (карбон), отражающая способность которых значительно различается. Модуляционные составляющие, соответствующие отражению от пластиковых лопастей, не видны в диапазоне частот вещания цифрового эфирного телевидения, в то время как их можно наблюдать на более высоких частотах дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн.

В качестве информативного признака для распознавания по спектральному портрету предложено использовать периоды повторения модуляционных составляющих. Оценка периодов повторения может быть реализована с помощью разработанного алгоритма обработки данных в ПКЛ, обобщенная функциональная схема которого представлена на рисунке 7.

Алгоритм включает в себя следующие этапы:

- выделение спектрального портрета, на котором выполняется поиск элемента задержки с пропеллерной модуляции;
- компенсация шумов, в результате которой выполняется подавление шума и фюзеляжной составляющей;
- переход во временную область с помощью обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ);
- обнаружение модуляционных составляющих, обусловленных отражениями от вращающихся лопастей;
- оценка периодов повторения модуляционных составляющих и обнаружение групп с одинаковым периодом;
- передача полученных оценок решающему устройству и последующее их сравнение со значениями из базы данных.

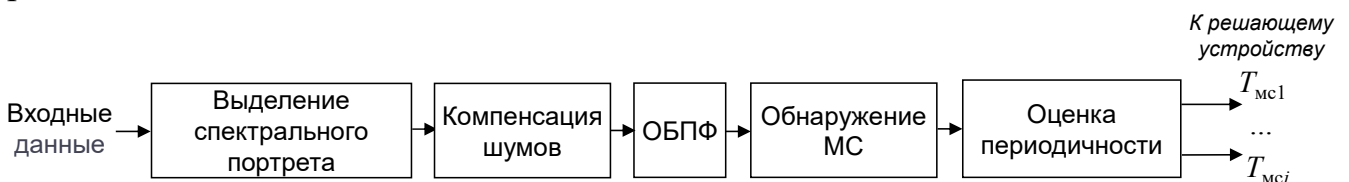


Рисунок 7 – Функциональная схема алгоритма оценки информативных признаков

На вход алгоритма поступают отсчеты двумерной взаимной функции неопределенности $|\Psi(\tau, f_d)|$ и матрица с отметками целей, обнаруженными на этапе пороговой обработки данных в ПКЛ. На первом этапе алгоритма на всех элементах по задержке в матрице обнаруженных целей осуществляется поиск элемента задержки $\tau_{ПМ}$ в котором присутствует пропеллерная модуляция, обусловленная

вращающимися частями ЛА, и выделяется сечение ВФН $W_{\text{ГМ}}(f_{\text{д}}) = \Psi(\tau_{\text{ГМ}}, f_{\text{д}})$ по соответствующему элементу задержки. Для каждого элемента задержки сечение ВФН вычисляется с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) свертки принятого и опорного сигналов, поэтому сечение ВФН представляет собой вектор значений их взаимного спектра (далее - доплеровского спектра).

После выделения спектрального портрета осуществляется компенсация шумов, а также фюзеляжной составляющей цели. Компенсация шумов производится путем обнуления элементов вектора спектрального портрета, в которых отсутствуют обнаружения модуляционных составляющих. Компенсация фюзеляжной составляющей включает в себя компенсацию доплеровского сдвига, обусловленного движением цели, и подавление амплитуды спектральной компоненты от фюзеляжа. Оценка доплеровской частоты фюзеляжа осуществляется путем поиска составляющей спектрального портрета с максимальной амплитудой.

На следующем этапе выделенный спектр пропеллерной модуляции преобразуется во временную область с помощью ОБПФ $z(t) = F^{-1}(W_{\text{ГМ}}(f_{\text{д}}))$. Полученный в результате вектор взаимной корреляции принятого и опорного сигналов служит оценкой эхосигнала от винтомоторного ЛА и используется далее для обнаружения модуляционных составляющих и оценки их периодичности.

Обнаружение модуляционных составляющих, обусловленных вращением лопастей, осуществляется с помощью одномерного алгоритма адаптивного обнаружения. В результате формируется вектор моментов времени появления модуляционных составляющих $t_{\text{МС}}$.

На следующем этапе производится разделение обнаруженных МС на группы с одинаковым периодом повторения по критерию кратности в пределах заданной доверительной погрешности. Далее период повторения МС в сформированных группах периодичных МС вычисляется как среднее значение разностей временных положений соседних МС:

$$T_{\text{МС}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}).$$

Полученные в результате обработки данных значения периодов повторения $T_{\text{МС}}$ передаются решающему устройству. Путем сравнения полученных параметров со значениями из базы данных решающее устройство принимает решение о принадлежности наблюдаемой цели к конкретному классу и, если возможно, идентифицирует тип цели внутри класса.

На программную реализацию разработанного алгоритма были получены свидетельства о регистрации программы для ЭВМ

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований спектральных портретов сигналов, отраженных от целей различных классов, а также результаты апробации предложенного метода распознавания и алгоритма оценки информативных признаков. Экспериментальные исследования проводились с помощью двух опытных образцов ПКЛ, работающих в разной помеховой обстановке: в пересеченной местности и в городских условиях. В первом случае в качестве радиолокационного подсвета использовались сигналы второго

мультиплекса Ленинградского радиотелевизионного передающего центра на 45 канале стандарта DVB-T2 (центральная частота 666 МГц), во втором – сигналы первого мультиплекса на 35 канале (586 МГц). В ходе экспериментов осуществлялась запись сигналов канала наблюдения и прямого сигнала во время нахождения интересующей цели в секторе наблюдения ПКЛ. Далее выполнялась постобработка полученных записей с помощью разработанного алгоритма.

Исследования проводились для воздушных целей четырех классов: «винтовой самолет», «вертолет», «БПЛА» и «птица». На рисунке 8 показаны ВФН и результат пороговой обработки данных при наблюдении винтового самолета Cessna 172, приближающегося к ПКЛ. На рисунке 9 показаны извлеченные с помощью разработанного алгоритма доплеровский спектр и временная реализация отраженного сигнала в момент полета цели на высоте 300 м на расстоянии около 3,5 км от приемной позиции ПКЛ. Полученное в результате обработки значение периода повторения составляет 6,5 мс, что строго соответствует расчетному значению периода повторения МС от трехлопастного винта самолета Cessna 172, находящегося в крейсерском режиме полета ($f_B = 1500$ об/м).

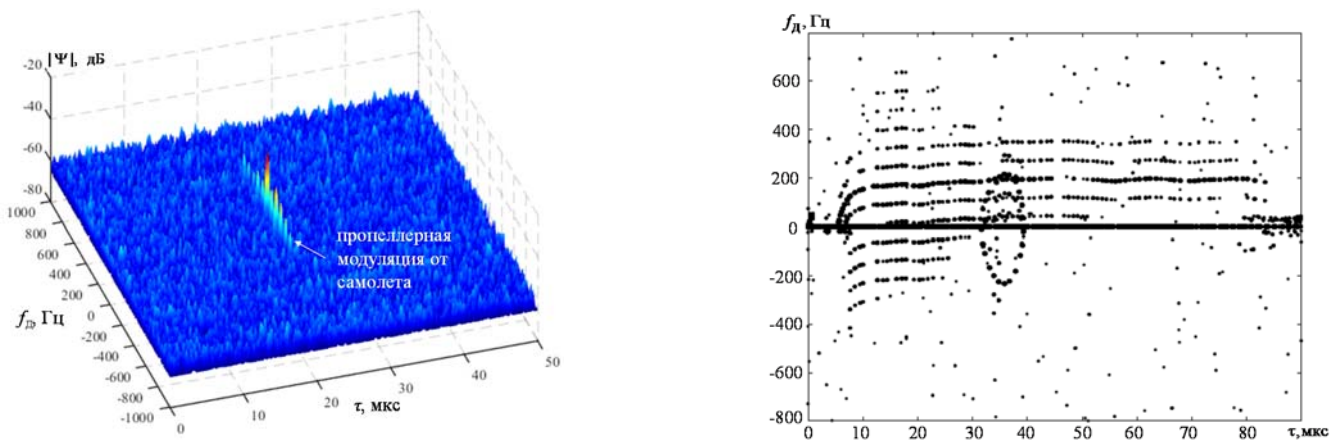


Рисунок 8

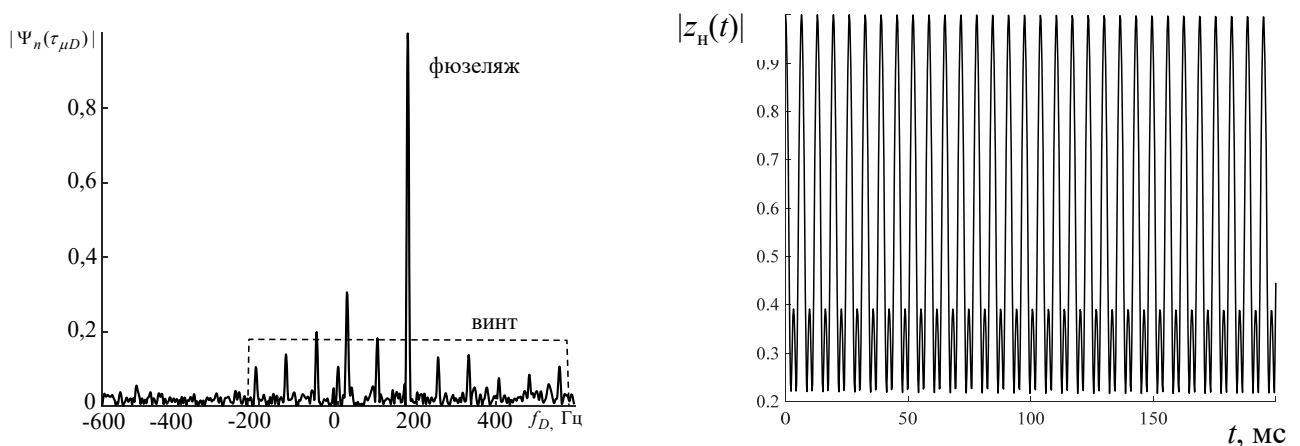


Рисунок 9

Результаты обработки сигналов, записанных при наблюдении туристического вертолета Ми-8, совершающего полет на расстоянии 3 км от ПКЛ, показаны на рисунках 10-11. Были обнаружены две группы периодических МС: составляющие с большим периодом повторения 31,23 мс обусловлены отражениями от лопастей несущего винта (треугольные маркеры на рисунке 11), с меньшим периодом 8,92 мс

– отражениями от лопастей рулевого винта вертолета (квадратные маркеры). Полученные значения соответствуют расчетным периодам повторения МС для вертолета Ми-8.

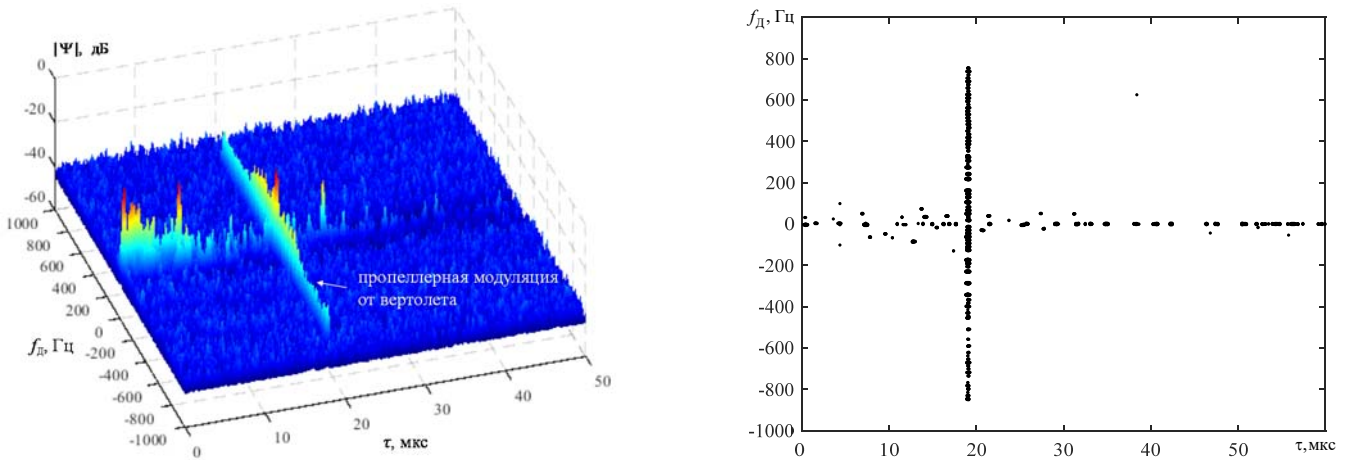


Рисунок 10

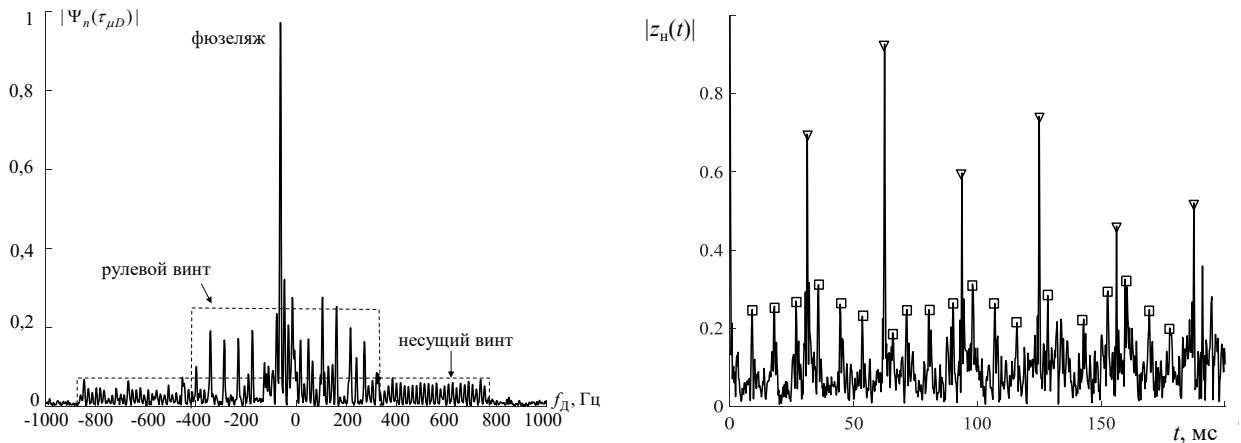


Рисунок 11

В ходе исследований был проведен анализ влияния сигналов, отраженных от БПЛА и птиц, на характер отклика ВФН. На рисунке 12 показаны ВФН (а), доплеровский спектр эхосигнала от птицы (б) и квадрокоптера DJI Phantom 3 (в), а также реализация эхосигнала от БПЛА во времени (г). Отражениям от птиц соответствуют одиночные отклики на ВФН. В свою очередь, отклик на эхосигнал от квадрокоптера представляет собой пропеллерную модуляцию от всех вращающихся лопастей.

В результате обработки этих данных с помощью разработанного алгоритма во временной области была обнаружена одна последовательность периодических пиков. Период повторения обнаруженных модуляционных составляющих равен 6,5 мс, что соответствует удвоенному периоду вращения пропеллера. Следовательно, пропеллеры квадрокоптера вращаются со скоростью 5100 об/м. Измеренное значение попадает в диапазон реальных значений скорости вращения пропеллеров БПЛА этого типа (от 4250 до 5750 об/м).

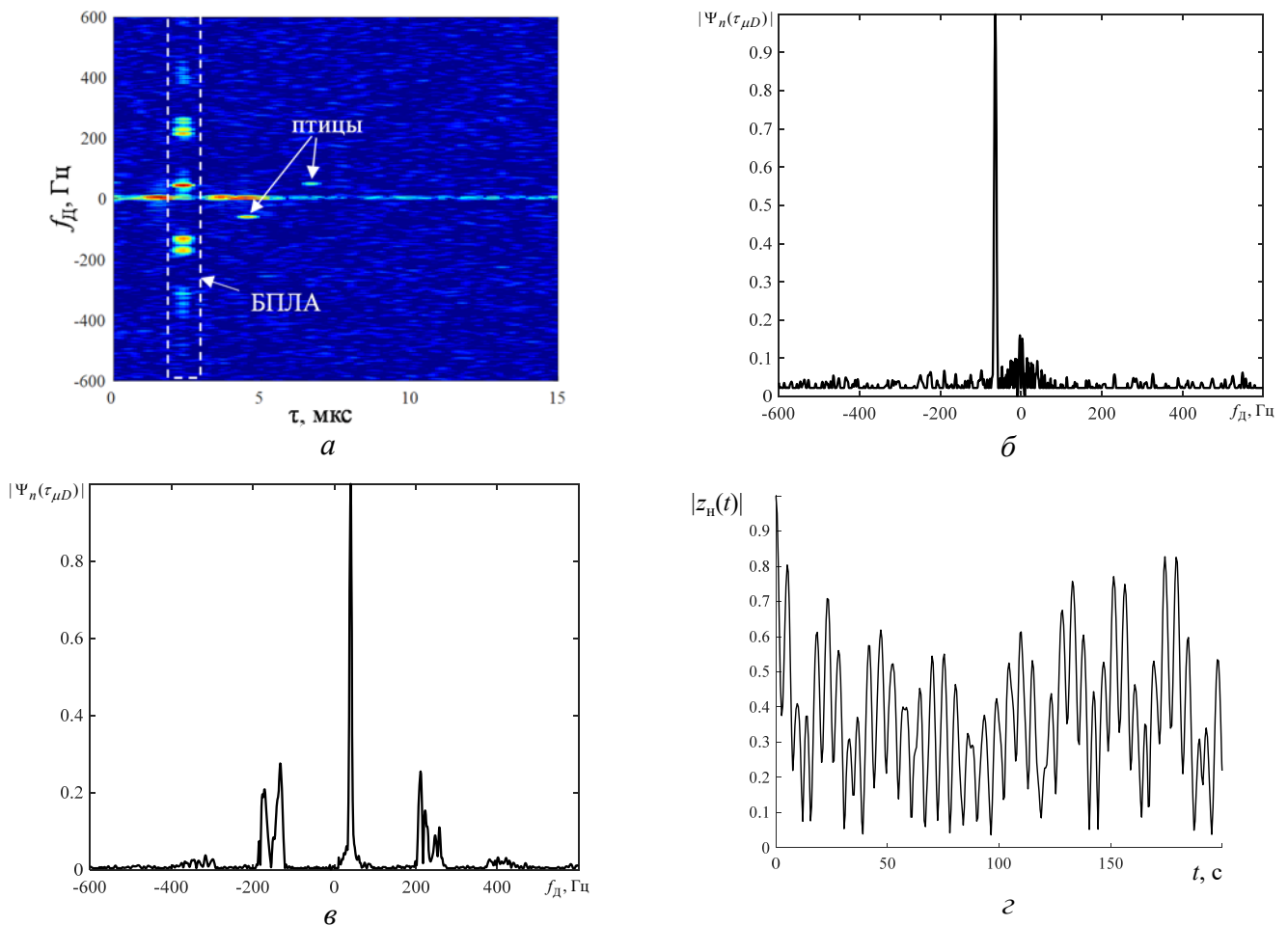


Рисунок 12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведён теоретический и экспериментальный анализ информативных признаков распознавания воздушных целей различных классов. Показано, что для достоверного распознавания воздушных целей целесообразно использовать в совокупности траекторные и сигнальные признаки. В пассивном когерентном локаторе, работающем по сигналам ЦЭТВ, предложено использовать оценки скорости целей для предварительного сужения пространства классов распознаваемых целей. При пересечении диапазонов возможных скоростей движения и неоднозначности в принятии решения о классе распознаваемой цели необходимо использовать параметры вторичной модуляции, извлекаемые из спектрального портрета отраженных от цели сигналов.

2. Разработана математическая модель описания сигналов, отраженных от вращающихся лопастей винтомоторных летательных аппаратов при бистатической геометрии взаимного расположения приемной позиции ПКЛ, наблюдаемой цели и источника подсвета. Проведено моделирование сигналов, отраженных от вращающихся лопастей винтомоторных ЛА классов «винтовой самолет», «вертолет», «БПЛА» в диапазоне частот работы ЦЭТВ. Результаты моделирования показали, что по временной реализации отраженного сигнала можно получить

достоверные оценки периодов повторения модуляционных составляющих, обусловленных отражениями от вращающихся лопастей винтомоторных ЛА.

3. Разработан оригинальный метод распознавания воздушных целей в ПКЛ со сторонним подсветом от передатчиков ЦЭТВ по совокупности траекторных и сигнальных признаков, который в натуральных условиях показал возможность достоверного распознавания воздушных целей классов «винтовой самолет», «вертолет» и «БПЛА».

4. Разработан, реализован и экспериментально апробирован алгоритм оценки информативных признаков распознавания воздушных целей по спектральному портрету в ПКЛ со сторонним подсветом от передатчиков ЦЭТВ. Получены спектральные портреты легкомоторного самолета Cessna 172, вертолета Ми-8, различных БПЛА типа квадрокоптер. Получены оценки параметров пропеллерной модуляции, а именно периоды повторения модуляционных составляющих, обусловленных отражениями от вращающихся лопастей ЛА, которые соответствуют расчетным значениям. Показаны отличия в структуре спектра отраженного сигнала для БПЛА с винтами, изготовленными из пластика и карбона.

5. Созданы специализированные программные модули для реализации разработанных в рамках исследований моделей и алгоритмов, которые получили правовую защиту в виде свидетельств о госрегистрации программы для ЭВМ.

Результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований показали возможности и ограничения пассивных когерентных локационных систем со сторонним подсветом от передатчиков цифрового эфирного телевидения при решении задачи распознавания воздушных целей.

Разработанные методологические и алгоритмические решения прошли успешную апробацию на значительном наборе экспериментальных данных и могут быть использованы для практической реализации систем автоматического распознавания винтомоторных летательных аппаратов в пассивном когерентном локаторе.

Список основных публикаций по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Воробьев, Е.Н. Распознавание винтомоторных летательных аппаратов в пассивной бистатической РЛС / Е.Н. Воробьев, В.И. Веремьев, Д.В. Холодняк // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – № 6. – 2018. – С. 75–82.

2. Воробьев, Е.Н. Исследование сигнальных признаков распознавания малых БПЛА в полуактивной РЛС / Е.Н. Воробьев // Вестник Новгородского государственного университета. Сер.: Технические науки. – 2019. – №4(116). – С.72-77.

Монографии

3. Бархатов, А. В Пассивная когерентная радиолокация. // А. В. Бархатов, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев, А. А. Коновалов и др. – С.-Пб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – 163 с. – ISBN 978-5-7629-1921-0.

В изданиях, индексируемых в информационных системах Web of Science и Scopus

4. Barkhatov, A. Toward 3D passive radar exploiting DVB-T2 transmitters of

opportunity / A. Barkhatov, E. Vorobev, V. Veremyev, V. Kutuzov // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2019. – V. 11, N. 7. – P. 577–583.

5. Vorobev, E. DVB-T2 Passive Coherent Location Radar / E. Vorobev, A. Barkhatov, V. Kutuzov // Proc. 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), St. Petersburg, Russia. – 2016. – P. 470-474.

6. Vorobev, E. N. Passive Coherent Location Radar for Security of Especially Important Objects / E. N. Vorobev, A. V. Barkhatov, V. M. Kutuzov, V. N. Malyshev et al. // Proc. 2016 IEEE V Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), St. Petersburg, Russia. – 2016. – P. 3-5.

7. Barkhatov, A. Experimental results of DVB-T2 passive coherent location radar / A. Barkhatov, E. Vorobev and A. Konovalov // Proc. 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, Russia. – 2017. – P. 1229-1232.

8. Vorobev, E. N. Helicopter recognition in DVB-T2 passive bistatic radar / E. N. Vorobev // Proc. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia. – 2018. – P. 1171-1173.

9. Vorobev, E. DVB-T2 passive radar developed at Saint Petersburg Electrotechnical University / E. Vorobev, A. Barkhatov, V. Veremyev, V. Kutuzov // Proc. 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan, Poland. – 2018. – P. 204-207.

10. Vorobev, E. Recognition of Propeller-Driven Aerial Targets in DVB-T2 Passive Bistatic Radar / E. Vorobev, V. Veremyev, V. Kutuzov // Proc. 2018 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, Germany. – 2018. – P. 1-8.

11. Vorobev, E. Experimental DVB-T2 Passive Radar Signatures of Small UAVs / E. Vorobev, V. Veremyev, N. Tulenkov // Proc. 2019 Signal Processing Symposium (SPSymo), Krakow, Poland. – 2019. – P. 67-70.

12. Vorobev, E. Passive Radar Signatures of Micro-Drone and Birds / E. Vorobev, V. Veremyev, V. Kutuzov // Proc. 2019 International Radar Symposium (RADAR), Toulon, France. – 2019. – P. 1-4.

13. Plotnitskaya, E. Theoretical Model of the Signal Reflected from Rotating Blades of Aerial Targets / E. Plotnitskaya, V. Veremyev, E. Vorobev // Proc. 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russia. – 2020. – P. 1-4.

14. Plotnitskaya, E. Simulation of Bistatic Signatures from Rotating Blades of Aerial Targets / E. Plotnitskaya, E. Vorobev, V. Veremyev // Proc. 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), St. Petersburg, Russia. – 2021. – P. 1663-1667.

15. Plotnitskaya, E. Analysis of Spectrum Signatures from Rotating Blades of Small Drone / E. Plotnitskaya, E. Vorobev, V. Veremyev // Proc. 2021 Signal Processing Symposium (SPSymo), Lodz, Poland. – 2021. – P. 212-215.

Публикации в сборниках трудов конференций

16. Воробьев, Е. Н. Распознавание винтомоторных летательных аппаратов в РЛС мониторинга / Е. Н. Воробьев // Proc. International Conference «Системы

Радиолокационного Мониторинга/Radar Monitoring Systems-2017 (RMS'2017)», Hanoi, Vietnam. – 2017. – С. 85-91.

17. Плотницкая, Е. С. Теоретическая модель сигнала, отраженного от вращающихся винтов вертолета / Е. С. Плотницкая, В. И. Веремьев, Е. Н. Воробьев // Сборник трудов 22-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение», Москва. – 2020. – С. 327-331.

18. Плотницкая, Е. С. Анализ спектральных портретов от вращающихся винтов малых БПЛА / Е. С. Плотницкая, Е. Н. Воробьев // Региональная молодежная научная конференция «Будущее науки в Санкт-Петербурге», Санкт-Петербург. – 2021. – С. 127-132.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

19. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2018664949. Российская Федерация. Оценка параметров двигательной установки винтомоторных летательных аппаратов в пассивной бистатической РЛС / Е. Н. Воробьев; правообладатель ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)” (RU). – № 2018661879 заявл. 29.10.2018; опубл. 26.11.2018. – 1 с.

20. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2019665519. Российская Федерация. Программа для частотно-временного анализа сигнатур радиолокационных целей / Е. Н. Воробьев, А. В. Бархатов; правообладатель ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)” (RU). – № 2019664684 заявл. 18.11.2019; опубл. 25.11.2019. – 1 с.

21. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2020619363. Российская Федерация. Программа имитационного моделирования отраженных сигналов от винтомоторных летательных аппаратов / Е. С. Плотницкая, Е. Н. Воробьев, В. И. Веремьев; правообладатель ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)” (RU), Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор» (АО «НИИ «Вектор») (RU). – № 2020618362 заявл. 30.07.2020; опубл. 17.08.2020. – 1 с.

22. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2020664930. Российская Федерация. Моделирование сигнатур винтомоторных летательных аппаратов в бистатической РЛС / Е. С. Плотницкая, Е. Н. Воробьев; правообладатель ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)” (RU). – № 2020664032 заявл. 13.11.2020; опубл. 19.11.2020. – 1 с.

23. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2021680190. Российская Федерация. Программа для радиолокационного распознавания винтомоторных летательных аппаратов по спектральному портрету / Е. Н. Воробьев, Е. С. Плотницкая; правообладатель ФГАОУ ВО “Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)” (RU). – № 2021669483 заявл. 01.12.2020; опубл. 07.12.2021. – 1 с.