

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАБОТЫ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ПТИЦ НА ОСНОВЕ МИКРОДОПЛЕРОВСКИХ СИГНАТУР В СРЕДЕ ENGEE

А. Е. Семичастнов¹ [0009-0003-2301-6267], Д. А. Балакин² [0000-0003-0497-7153]

^{1, 2}ООО ЦИТМ ЭКСПОНЕНТА, г. Москва, 117418, Россия

^{1, 2}Московский энергетический институт, г. Москва, 111250, Россия

¹semichastnov777@yandex.ru, ²dabalakin@yandex.ru;

Аннотация

Рассмотрен метод классификации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и птиц по радарным измерениям при различных сценариях их движения. Актуальность решения этой задачи подтверждается сложностью обнаружения БПЛА ввиду небольших их габаритных размеров, высокой маневренности, а также схожей геометрией с птицами. Для решения задачи применен метод классификации, основанный на анализе микродоплеровских сигнатур (МДС), которые отражают динамику движения объектов. Моделирование сценариев выполнено в среде Engее, где разработаны модели радиолокационной системы (РЛС), БПЛА и птиц.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, микродоплеровские сигнатуры, радиолокационная система, диаграмма обратного рассеяния, цифровая обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) применяются как в гражданской, так и в военной сферах, что делает актуальным вопрос их надежного обнаружения, в том числе для защиты критически важных объектов [1].

Для обнаружения БПЛА применяются различные методы: радиочастотный анализ, акустические датчики, оптические системы и анализ радиочастотного тракта. Анализ радиочастотного тракта (например, идентификация сигналов

управления) теряет актуальность с развитием автономных БПЛА. Акустические системы чувствительны к шумам окружающей среды, а оптические камеры ограничены дальностью действия и ухудшением работы в плохих погодных условиях. Комплексный подход, объединяющий данные от нескольких источников, позволяет повысить надежность обнаружения за счет взаимной компенсации недостатков отдельных методов. Однако ключевую роль в таких системах играют радиолокационные технологии, обеспечивающие всепогодность и высокую дальность обнаружения [2]. Они позволяют отслеживать объекты на значительных дистанциях и в любых погодных условиях. Однако из-за того, что БПЛА и птицы имеют схожие размеры, часто возникают ложные срабатывания, что создает значительные проблемы. Поэтому требуется создание новых методов, позволяющих повысить эффективность обнаружения и снизить количество ошибок [3].

Радиолокационные методы сталкиваются с проблемой нехватки данных, поскольку сложно получить измерения при различных сценариях поведения объекта. Одним из решений этой проблемы является моделирование. Как правило, такие модели состоят из множества функциональных узлов, каждый из которых представляет собой модель. В связи с этим возникает сложность интеграции разнородных моделей в единую систему. В настоящей статье рассмотрены модель локационной станции, модель формирования диаграммы обратного рассеяния цели и модель цифровой обработки. Представлен процесс интеграции этих моделей в единую систему. В качестве инструмента выступает среда моделирования Engage [4].

МОДЕЛЬ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ (РЛС)

Структура базовой модели радиолокационной системы (РЛС) подробно рассмотрена в [5]. С учетом поставленной задачи можно выделить следующие основные функциональные узлы (рис. 1): генератор – формирует зондирующий сигнал; передатчик – усиливает и излучает электромагнитную волну в среду распространения; канал распространения – учитывает пространство между РЛС и целью; цель – характеризует отражательную способность исследуемого объекта; приемник – выполняет прием сигнала, отраженного от цели; цифровая обработка – реализует фильтрацию и расчет информативных характеристик (в рассматриваемой работе – микродоплеровские сигнатуры (МДС)).

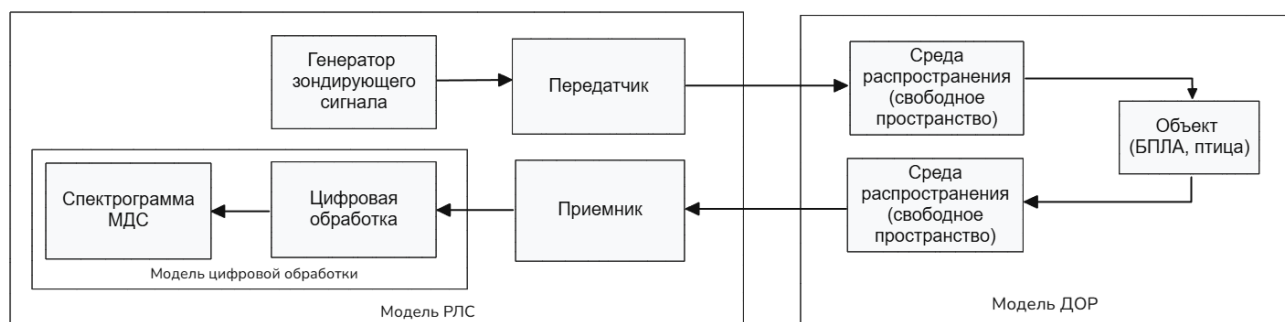


Рис. 1. Структурная схема системной модели для определения МДС

Основные тактико-технические характеристики РЛС (мощность, длительность и период повторения импульса, ширина спектра) задаются исходя из поставленных задач качества разрешения по дальности и скорости движения объектов. В настоящей работе реализована модель РЛС в среде моделирования Engage [4].

МОДЕЛЬ ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТА

Ключевым этапом разработки модели является расчет диаграммы обратного рассеяния (ДОР) детектируемого объекта. Для рассматриваемых объектов (птиц или БПЛА) важно учитывать не только их геометрию, но и динамику движения, так как дополнительные движения (взмахи крыльев или вращение лопастей) обогащают спектрограмму отраженного сигнала периодическими составляющими. Такие компоненты спектра называют микродоплеровские сигнатурами.

Вычисление ДОР реализуется с помощью подхода, заключающегося в разбиении целевого объекта на простейшие геометрические элементы (примитивы), для которых известно аналитическое выражение. Суммарный сигнал формируется по принципу суперпозиции отраженного сигнала от каждого примитива, рассматриваемого как элементарный излучатель.

Конструкция БПЛА типа «квадрокоптер» позволяет разделить его на следующие компоненты: четыре двухлопастных ротора (заменены на две плоские пластины) и корпус БПЛА, представленный цилиндрическими поверхностями (рис. 2а). ДОР данной модели БПЛА представлена на рис. 2б.

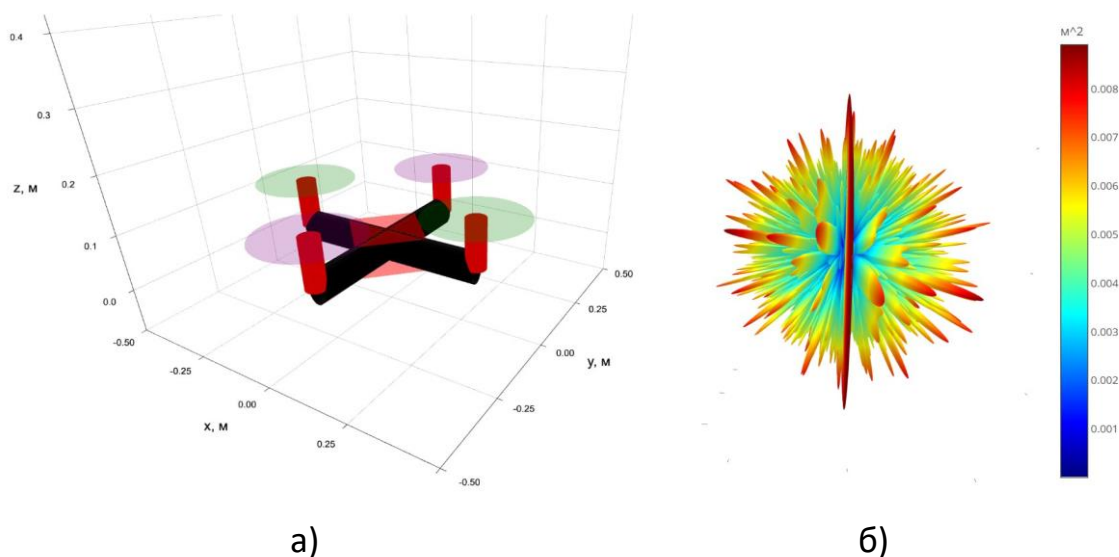


Рис. 2. Цифровая модель (а), диаграмма обратного рассеивания (б) БПЛА типа «квадрокоптер»

При характеристике птицы как объекта обнаружения следует принимать во внимание ее орнитологические характеристики и особенности полета. В строении крыла можно выделить несколько элементов: плечевую кость, которая является верхней частью крыла; предплечье, состоящее из локтевой и лучевой частей, и кисть. Движения крыльев представляют собой подъем и опускание верхней части предплечья относительно суставов. Основными элементами крыла, формирующими микроплеровские сигнатуры, являются плечевая кость и предплечье. Кисть практически не влияет на спектр отраженного сигнала ввиду небольших размеров, поэтому для простоты кисть и предплечье рассматриваются как единый элемент. Такие элементы с достаточной точностью можно описать с помощью эллиптического тела (эллипсоида), ДОР которого аппроксимируется выражением

$$\sigma_{\text{ellip}}(\theta, \varphi) = \frac{\pi a^2 b^2 c^2}{(a^2 \sin^2(\theta) \cos^2(\varphi) + b^2 \sin^2(\theta) \sin^2(\varphi) + c^2 \cos^2(\theta))}, \quad (1)$$

где a, b, c – длины полуосей эллипсоида, φ – азимутальный угол, θ – полярный угол. Внешний вид и ДОР птицы представлены на рис. 3.

Выражение (1) позволяет вычислить значения эффективной площади рассеяния элементов птицы для любого направления прихода сигнала по азимутальному и полярному углам без применения ресурсоемких операций, что критически важно при моделировании сценариев движения в режиме реального времени.

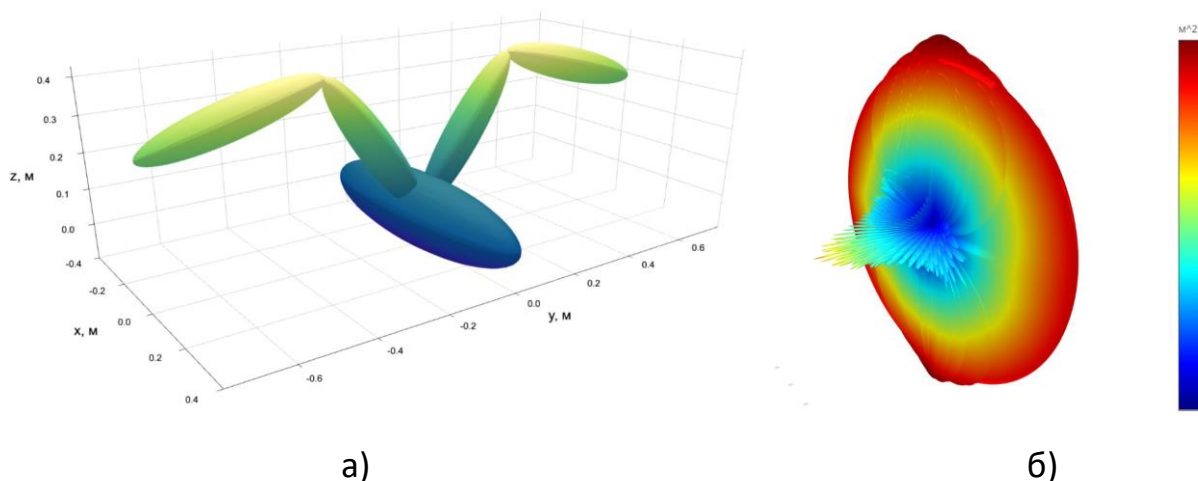


Рис. 3. Цифровая модель (а) и диаграмма обратного рассеивания (б) для птицы

После вычисления ДОР исследуемых объектов применим алгоритмы расчета отраженного сигнала из [6] и выполним запуск сценария, на выходе которого сформируются целевые МДС объектов. Результат моделирования работы РЛС при частоте вращения винта БПЛА, равной 100 Гц, и частоте взмаха крыльев птицы, равной 3 Гц, приведены на рис. 4.

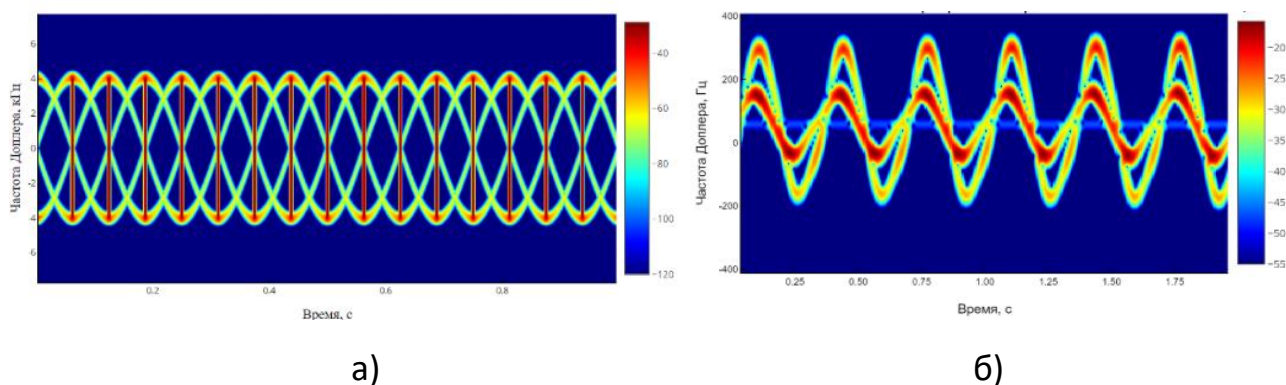


Рис. 4. Спектрограмма отраженного сигнала: а) БПЛА вертолетного типа; б) птицы

Можно заметить, что характеры МДС для птицы и БПЛА отличаются, что позволяет решить задачу классификации. Благодаря периодической структуре МДС,

выполнив дополнительную обработку, можно извлечь параметры движения объекта: частоту вращения крыльев и скорость вращения винта.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ РАБОТЫ РЛС

Финальный этап формирования модели состоит в интеграции ранее разработанных структурных частей в общую системную модель. Реализация такой модели в среде моделирования Engage приведена на рис. 5.

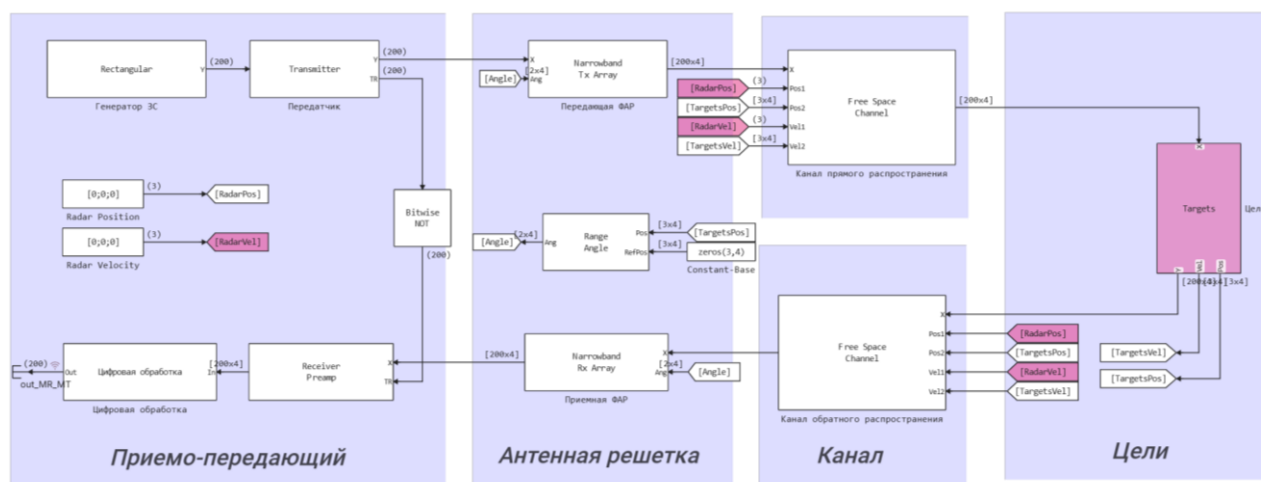
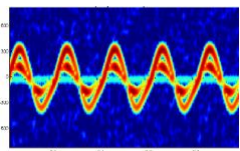
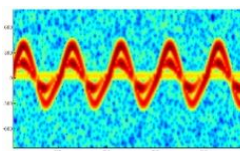
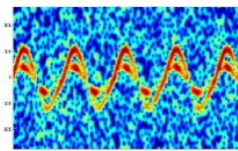
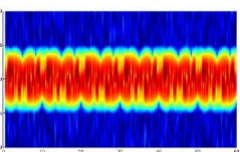
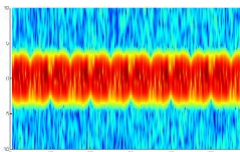
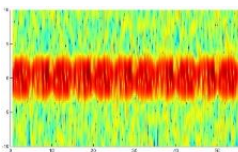


Рис. 5. Системная модель, реализованная в среде моделирования Engage

После реализации всех этапов моделирования требуется провести проверку работоспособности РЛС при решении задач обнаружения БПЛА и птиц. Модель имеет огромное количество параметров, которые можно изменять при расчете сценария. Наиболее важными среди них являются расстояния от РЛС до объекта, траектория движения цели, относительная скорость движения, скорости вращения винтов у БПЛА и взмаха крыльев птиц. В табл. 1 приведены МДС при варьировании дальности до объекта.

Принятие решения о классе объектов по МДС может быть выполнено как оператором, так и реализовано автоматически при помощи встраивания дополнительной обработки на основе сверточных нейронных сетей, способных при достаточной выборке обеспечить высокую точность классификации.

Табл. 1. МДС при варьировании дальности до объекта

Тип объекта	Дальность до объекта		
	200 м	400 м	800 м
Птица			
БПЛА типа квадрокоптер			

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование метода анализа МДС позволяет классифицировать БПЛА и птиц с применением цифровой модели РЛС и радиолокационных целей. Эта модель имеет большое количество изменяемых параметров системы, что дает возможность исследовать поведение РЛС при различных сценариях движения целей, включая реальные траектории объектов. Такой подход позволяет генерировать синтетические данные отраженного сигнала от различных объектов для обучения искусственных нейронных сетей с целью увеличения точности результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев В.И., Звонарев В.В., Лисицын Ю.Е. Методика обоснования рациональных способов управления беспилотным летательным аппаратом // Труды МАИ. 2020. № 112. 20 с. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16>
2. Карташов В.М. Методы обнаружения-распознавания радиолокационных, акустических, оптических и инфракрасных сигналов беспилотных летательных аппаратов // Радиотехника. 2021. № 2 (205). С. 138–153. <https://doi.org/10.30837/RT.2021.2.205.15>
3. Park S., Shin S., Kim Y., Matson E.T. Combination of Radar and Audio Sensors for Identification of Rotor-type Unmanned Aerial Vehicles // (UAVs). 2015. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370533>

4. Российская платформа математических вычислений и динамического моделирования Engage // Engage аккаунт пользователя.

URL: <https://start.engage.com> (дата обращения: 30.05.2025).

5. *Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A.* Principles of Modern Radar. Vol.1 Basic Principles, 2010. 960 p.

6. *Chen V.C.* The Micro-Doppler Effect in Radar, Artech House, 2011. 290 p.

SIMULATION OF RADAR OPERATION SCENARIOS FOR CLASSIFYING UNMANNED AERIAL VEHICLES AND BIRDS BASED ON MICRODOPPLER SIGNATURES IN THE ENGAGE ENVIRONMENT

A. E. Semichastnov¹ [0009-0003-2301-6267], **D. A. Balakin**² [0000-0003-0497-7153]

^{1, 2}*ETMC EXPONENTA LTD, Moscow, 117418, Russia*

^{1, 2}*Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250, Russia*

¹*Semichastnov777@yandex.ru*, ²*dabalakin@yandex.ru*;

Abstract

The paper considers a method for classifying unmanned aerial vehicles (UAVs) and birds based on radar measurements in various object movement scenarios. The relevance of the problem is explained by the complexity of UAV detection due to its small overall dimensions, high agility, and similar geometry to a bird. To solve the problem, a classification method based on the analysis of micro-Doppler signatures, which reflect the dynamics of object motion, is applied. The scenarios are modelled in the Engage environment, where models of radar system, UAV and birds are developed.

Keywords: *unmanned aerial vehicle, micro-Doppler signatures, radar system, backscatter diagram, digital processing.*

REFERENCES

1. *Dmitriev V.I., Zvonarev V.V., Lisitsyn Yu.E.* Methodology for substantiating rational methods of unmanned aerial vehicle control // Proceedings of MAI. 2020. No. 112. 20 p. <https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16>

2. *Kartashov V.M.* Methods for detecting and recognising radar, acoustic, optical and infrared signals from unmanned aerial vehicles // *Radio Engineering*. 2021. No. 2 (205). P. 138–153. <https://doi.org/10.30837/RT.2021.2.205.15>
 3. *Park S., Shin S., Kim Y., Matson E.T.* Combination of Radar and Audio Sensors for Identification of Rotor-type Unmanned Aerial Vehicles // (UAVs). 2015. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2015.7370533>
 4. Russian dynamic modeling environment Engee // Engee user account. URL: <https://start.engee.com> (accessed: 30.05.2025).
 5. *Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A.* Principles of Modern Radar Vol. 1. Basic Principles, 2010. 960 p.
 6. *Chen V.C.* The Micro-Doppler Effect in Radar. Artech House, 2011. 290 p.
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



СЕМИЧАСТНОВ Алексей Евгеньевич – инженер отдела радиотехнических систем ЦИТМ «Экспонента». Сфера научных интересов: цифровая обработка сигнала, моделирование радиолокационных систем.

Alexey Evgenievich SEMICHASTNOV – Engineer, Radio Engineering Systems Department, ETMC EXPONENTA LTD. Research interests: digital signal processing, modelling of radar systems.

email: Semichastnov777@yandex.ru

ORCID: 0009-0003-2301-6267



БАЛАКИН Дмитрий Александрович – к.т.н., руководитель отдела радиотехнических систем ЦИТМ «Экспонента», доцент кафедры ОПТ НИУ МЭИ. Сфера научных интересов: разработка и моделирование радиотехнических систем, исследование алгоритмов обработки сигналов.

Dmitry Alexandrovich BALAKIN – PhD, Head of the Radio Engineering Systems Department at ETMC EXPONENTA LTD, Associate Professor at the Department of Operational Research at the National Research University Moscow Power Engineering Institute. Research interests: development and modelling of radio engineering systems, research into signal processing algorithms.

email: dabalakin@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-0497-7153

Материал поступил в редакцию 9 августа 2025 года