

Труды МАИ. 2023. № 129  
Trudy MAI, 2023, no. 129

Научная статья  
УДК 621.396.967  
DOI: [10.34759/trd-2023-129-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-21)

## **МЕТОД ПЕРЕХВАТА МАЛОРАЗМЕРНЫХ И МАЛОЗАМЕТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**Антон Александрович Сенцов<sup>1✉</sup>, Вадим Борисович Поляков<sup>2</sup>,  
Сергей Александрович Иванов<sup>3</sup>, Татьяна Геннадьевна Помозова<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>[toxx@list.ru](mailto:toxx@list.ru)✉

<sup>2</sup>[vadim7702@yandex.ru](mailto:vadim7702@yandex.ru)

<sup>3</sup>[kabalustik@mail.ru](mailto:kabalustik@mail.ru)

<sup>4</sup>[pomozova-tatyana@yandex.ru](mailto:pomozova-tatyana@yandex.ru)

***Аннотация.*** В настоящее время наблюдается стремительное развитие беспилотной авиации и расширение сферы её применения. Помимо применения в хозяйственной деятельности растёт круг задач беспилотной авиации специальными службами и в военной сфере. Особую опасность представляют собой малоразмерные и малозаметные беспилотные летательные аппараты. Возникает проблема обнаружения, сопровождения и перехвата малозаметных целей для защиты охраняемых социально значимых объектов. В статье предложен метод интеграции управления средств обнаружения, сопровождения и перехвата беспилотной авиации,

а также синхронизации управления решением этих задач. Приведено описание открытого протокола передачи информации, используемого в беспроводном канале двустороннего обмена для управления средством перехвата. Определены классы возможных объектов перехвата и структура комплекса для организации процесса перехвата. Предложены сценарии вариантов перехвата и приведены их временные характеристики, а также описаны варианты радиолокационных станций, обеспечивающих обнаружение малоразмерных и малозаметных объектов с низкими значениями эффективной площади рассеяния. Также в статье описана актуальная в настоящее время задача идентификации признаков воздушных объектов, наблюдаемых радаром, для распознавания и принятия решений с выделением классов искусственного и естественного происхождения. Определены методы извлечения полезных данных из отраженных сигналов с использованием свёрточной нейронной сети. Рассмотрены два варианта построения нейронной сети, в которых входные данные представлены в виде графического представления спектра отраженного сигнала (в оттенках серого) и в виде массивов чисел.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, беспилотный летательный аппарат, беспилотная авиация, обнаружение воздушных объектов, нейронная сеть

**Для цитирования:** Сенцов А.А., Поляков В.Б., Иванов С.А., Помозова Т.Г. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-21)

Original article

## METHOD OF INTERCEPTION OF SMALL AND INCONSPICUOUS UNMANNED AERIAL VEHICLES

**Anton A. Sentsov<sup>1</sup>**, **Vadim B. Polyakov<sup>2</sup>**, **Sergei A. Ivanov<sup>3</sup>**, **Tatyana G. Pomozova<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Saint-Petersburg State University of Economics, Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup>[toxx@list.ru](mailto:toxx@list.ru)

<sup>2</sup>[vadim7702@yandex.ru](mailto:vadim7702@yandex.ru)

<sup>3</sup>[kabalustik@mail.ru](mailto:kabalustik@mail.ru)

<sup>4</sup>[pomozova-tatyana@yandex.ru](mailto:pomozova-tatyana@yandex.ru)

**Abstract.** As of today, the onrush development of the unmanned aviation and of its application scope are observed. Besides the application in economic activity, the scope of the unmanned aviation functions by special services and in military sphere is constantly growing. The small-sized and nearly invisible unmanned aerial vehicles present are of special peril. The problem of low-observable targets detecting, tracking and intercepting for the socially significant objects protecting occurs. The article proposes a method for integration of the unmanned aviation detection, tracking and intercepting managing means, as well as synchronization of the control for these tasks solving. The article presents the description of the open information transfer protocol used in a wireless two-way exchange channel for the interception means control. Classes of possible interception objects and the structure of the complex for the interception process organization are determined. The article proposes scenarios of interception options, and presents their time characteristics as well as

describes the options for radar stations that ensure detection of small-sized and low-observable objects with low values of the effective scattering area. The article describes the currently up-to-date task of identifying features of the aerial objects observed by radar for recognition and decision-making with the allocation of classes of artificial and natural origin as well. The article defines methods of useful data extracting from the reflected signals employing a convolutional neural network, and considers two options of neural network structuring, in which the input data is represented as a graphical representation of the spectrum of the reflected signal (in grayscale) and in the form of arrays of numbers.

**Keywords:** radar station, unmanned aerial vehicle, unmanned aircraft, detection of aerial objects, neural network

**For citation:** Sentsov A.A., Polyakov V.B., Ivanov S.A., Pomozova T.G. Method of interception of small and inconspicuous unmanned aerial vehicles, *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-21)

## Введение

В настоящее время расширяется область применения беспилотной авиации, в том числе активно развивается направление создания миниатюрных летательных аппаратов, что повышает угрозу их использования в террористических целях. Объектами, подлежащими защите от таких угроз, являются границы, аэропорты, вокзалы, стадионы, места массового скопления людей, режимные предприятия, правительственные и государственные стратегически важные объекты.

Возможности военного применения беспилотной авиации не требуют подтверждения. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)

необходимо для выполнения задач, связанных с продолжительным ведением разведки, повышенной опасностью и сложностью, для обнаружения противника и вскрытия его боевых порядков, для выдачи разведывательной информации на пункт управления [1].

В связи с необходимостью противодействия беспилотной авиации, используемой для совершения терактов или боевых действий, а также для предотвращения проникновения миниатюрных летательных аппаратов на территорию социально значимых объектов, актуальными задачами являются их обнаружение и наведение соответствующих средств перехвата. Как правило, эти задачи разделены по управлению. Радиолокационный способ является наиболее эффективным среди реализуемых в настоящее время, обзор которых приведен в источниках [2-4]. Тем не менее, немаловажным фактором затруднения обнаружения таких летательных аппаратов является использование композиционных материалов, применяемых при создании их корпуса и обладающих низкими отражательными свойствами в радиодиапазоне [5].

Первичной задачей является обнаружение и сопровождение БПЛА, которая традиционно решается с помощью радиолокационной станции (РЛС). Она способна определить параметры движения, построить по результатам засечек траекторию движения БПЛА и сформировать целеуказание для средств перехвата в упреждающую точку [6]. Далее выполняется наведение и управление средствами перехвата, в котором РЛС не принимает участие, продолжая обзор пространства. В зависимости от применяемых средств перехвата и вида траектории БПЛА результат наведения может быть неопределенным.

Применение РЛС как к процессу управления средством перехвата, так и к контролю за этим процессом, способно увеличить вероятность успешного наведения за счет меньшего времени и более высокого темпа обмена информацией. В случае противодействия малозаметным БПЛА РЛС должна иметь способность обнаруживать объект с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) от 0,1 до 0,017 м<sup>2</sup> на удалении, достаточном для применения средств перехвата. У специальных военных БПЛА (с принятыми мерами по снижению уровня ЭПР) реальная ЭПР может иметь меньшее значение. Учитывая расширение спектра возникающих задач как по целевому назначению, так и по масштабу применения, РЛС должна иметь низкую стоимость, минимальные массогабаритные размеры, достаточные для решения задач обнаружения на безопасном для точки стояния энергетические характеристики и реализована в мобильном исполнении.

### **Твердотельная когерентная радиолокационная станция обнаружения воздушных объектов для наведения средств перехвата**

Твердотельная когерентная РЛС X-диапазона для автоматического определения параметров движения наблюдаемых целей, удовлетворяющая требованиям обнаружения и наведения соответствующих средств перехвата, многократно демонстрировалась на выставках и выполнена в соответствии с патентом [7]. Многочисленные полигонные испытания показали эффективность обнаружения и сопровождения малоразмерных БПЛА с ЭПР от 0,1 до 0,017 м<sup>2</sup> на удалении от 6 до 3 км соответственно. Внешний вид малоразмерного БПЛА (DJI

Phantom), применяемого в качестве типового воздушного объекта при разработке РЛС, представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид малоразмерного летательного аппарата DJI Phantom

В настоящее время происходит пересмотр подхода к развитию и применению БПЛА как средства разведки и поражающего воздействия ближайшего будущего. Нарастает тенденция применения малоразмерных и малозаметных БПЛА. В связи с низким значением ЭПР большинство существующих образцов РЛС не способны в достаточной степени эффективно обнаруживать такие объекты.

Базовый прототип когерентной РЛС [7], способной обнаруживать и сопровождать малоразмерные БПЛА с низкими значениями ЭПР, обладает средней мощностью излучения 200 Вт, исполнен в носимом варианте (с заплечными ремнями) весом до 15 кг и габаритными размерами 600x600x150 мм. Питание РЛС осуществляется от внутреннего аккумулятора (60-120 мин в зависимости от режима функционирования) или однофазной сети 220 В 50 Гц. Смена позиции РЛС составляет не более 5 мин, продолжительность сеанса наведения средства перехвата составляет от 5 до 8 мин, что позволяет осуществить несколько сеансов управления, используя БПЛА без смены его аккумулятора.

Достигнутые характеристики и низкая стоимость РЛС обеспечиваются применением технологии каскадируемых активных волноводных фазированных щелевых антенных решеток [8, 9]. Управляемое электронное сканирование, узкая диаграмма направленности и низкая излучаемая мощность обеспечивают высокую скрытность функционирования РЛС и делают целесообразным ее применение для решения задач обнаружения БПЛА и наведения средств перехвата.

Внешний вид когерентной РЛС обнаружения воздушных объектов представлен на рисунке 2. Рабочее место оператора (РМО) РЛС включает в свой состав программную реализацию пульта управления средством перехвата и может быть развернуто на удалении до 100 м от РЛС посредством кабеля Ethernet.



Рисунок 2 – Внешний вид когерентной РЛС обнаружения воздушных объектов

При обнаружении посредством РЛС объектов с малым значением ЭПР, возникает проблема отождествления полученной от БПЛА отметки от воздушной помехи (птицы, гидрометеоры и т.д.), которая успешно решена путем внедрения в РЛС интеллектуальных алгоритмов [10-12], обеспечивающих классификацию обнаруживаемых воздушных объектов на основе применения нейронных сетей.



Решение задачи классификации объектов позволяет описать поведение для каждого класса объектов. Используемая база знаний траекторий движения воздушного объекта повышает эффективность наблюдения объекта в воздухе и используется для прогнозирования его положения на каждый последующий дискрет времени.

### **Сценарии перехвата под управлением радиолокационной станции**

Несмотря на достигнутые характеристики РЛС, эффективность наведения средств перехвата снижается по причине асинхронного решения задачи обнаружения, сопровождения и наведения. Во-первых, задачи решаются различными техническими изделиями. Во-вторых, отсутствует синхронизация управления станциями, а также отсутствует обратная связь по выполнению задачи наведения. Для устранения этого недостатка и повышения эффективности решения задачи наведения управление средством перехвата (программный модуль пульта ручного управления БПЛА перехвата) реализовано на рабочем месте оператора РЛС. При обнаружении воздушного объекта и классификации его в качестве «потенциально опасного БПЛА» вычислитель из состава РМО РЛС инициирует алгоритм управления средством перехвата. Средство перехвата на базе БПЛА («анти-дрон») начинает движение в сторону обнаруженного и сопровождаемого «потенциально опасного БПЛА», задача сближения решается на основе алгоритмов ситуационного управления. В каждый дискрет времени РЛС определяет параметры движения обоих объектов в воздухе, формируется предсказание положения обнаруженного объекта к следующему дискрету времени и вырабатывается управление средству перехвата для обеспечения

сближения. При этом осуществляется оперативный контроль за движением обоих объектов на траектории. В момент достижения необходимого сближения происходит воздействие на БПЛА-цель средством перехвата. В случае успешного выполнения задачи перехвата БПЛА возвращается на стартовую позицию под управлением вычислителя РМО РЛС на линейном участке траектории. Посадку средства перехвата выполняет оператор при помощи ручного пульта управления. Таким образом, появляется возможность его многократного применения.

Фактически РЛС, интегрированная со средствами перехвата и управляющая синхронизацией решения задач обнаружения и перехвата, выполняет функции противовоздушной обороны для класса малоразмерных и малозаметных целей (ПВО-МРМЗЦ) при охране защищаемых объектов. Существенным преимуществом является то, что в традиционном случае средство поражения не имеет управления, а в предлагаемом методе управление выполняется с помощью РЛС, что повышает вероятность перехвата.

Актуальной задачей, выходящей за пределы данной статьи, является разработка защищенного беспроводного канала управления средством перехвата, который на текущий момент времени реализован по стандартному протоколу на частоте 2,4 Гц [13]. MAVLink (Micro Air Vehicle Link) — это протокол информационного взаимодействия с малыми беспилотными аппаратами любого типа, в иностранной литературе обозначаемых MAV (Micro Air Vehicle). MAVLink распространяется на условиях открытой лицензии в виде модуля для среды программирования python и генератора библиотек под различные языки, в том числе C/C++ библиотеки. Применяемый открытый протокол описывает информационное взаимодействие

между системами, такими как MAV и станцией наземного управления GCS (Ground control station), а также их составными частями — компонентами. Базовой сущностью MAVLink является пакет [14], имеющий формат, представленный на рисунке 3.

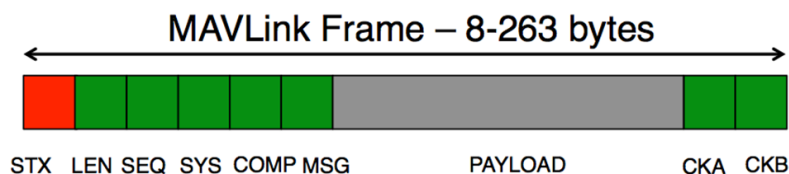


Рисунок 3 – Информационный пакет управления средством перехвата

Первый байт пакета (STX) — это символ начала сообщения: 0xFD для версии v2.0, 0xFE для версии v1.0, 0x55 для версии v0.9. LEN — длина полезной нагрузки (сообщения). Байт SEQ содержит счётчик пакета (0-255), который предназначен для выявления потери сообщений. SYS (System ID) — идентификатор отправляющей системы, а COMP (Component ID) — идентификатор отправляющего компонента. MSG (Message ID) — тип сообщения, от которого зависит, какие данные находятся в содержимом пакета. PAYLOAD — полезная нагрузка пакета, сообщение размером от 0 до 255 байт. Два последних байта пакета — CKA и CKB, нижний и верхний байт, соответственно, содержат контрольную сумму пакета.

Библиотека обрабатывает входные данные побайтово, добавляя их в буфер, после чего собирает из них пакет. Каждая система или компонент может одновременно обмениваться данными по разным источникам, тогда для каждого источника назначается специальный идентификатор, называемый channel (канал). MAVLink содержит буфер на каждый канал. Библиотека MAVLink позволяет кодировать и декодировать пакеты согласно протоколу, но она не регламентирует, какими аппаратными и программными средствами данные будут отправлены — это

могут быть TCP/UDP сообщения, обмен через последовательный порт. Основное условие применения протокола — обеспечение двухстороннего обмена.

Программная реализация управления средством перехвата на базе БПЛА обеспечивает выдачу корректирующих воздействий, влияющих на текущее направление и высоту движения на линейном участке траектории. Один из сценариев предполагает осуществление перехвата малоразмерного БПЛА (DJI Phantom 4 Pro) с использованием квадрокоптера. При обнаружении и начале сопровождения на удалении 6 км время подлета при крейсерской скорости с полезной нагрузкой 50 км/ч составляет 8 минут. Если использовать для перехвата гексакоптер типа DJI Matrice 600 (рисунок 4) или Mavic-3 (рисунок 5) с максимальной скоростью полета 70 км/ч с полезной нагрузкой (обеспечивающей перехват) и скоростью набора высоты 25 км/ч, то перехват будет обеспечен на удалении более 2,5 км от защищаемого объекта.



Рисунок 4 – Гексакоптер типа DJI Matrice 600



Рисунок 5 – Квадрокоптер DJI Mavic 3

При перехвате широко применяемых в настоящее время БПЛА типа Switchblade (версии Switchblade 300 и Switchblade 600) обнаружение и начало сопровождения произойдет на удалении от 15 до 20 км. Учитывая скорость полета с полезной нагрузкой 70 км/час, что значительно меньше максимальной скорости в пикировании (до 185 км/ч), перехват будет обеспечен на удалении от 3 - 5 км до защищаемого объекта. При перехвате БПЛА, выполняющих задачу разведки в режиме барражирования, задача перехвата упрощается благодаря полету в ограниченной зоне с невысокой скоростью и отсутствию временных ограничений.

Передача вычислителю РМО РЛС функций запуска управления движением средства перехвата сразу после обнаружения и классификации воздушного объекта позволит устранить возможные потери времени, связанные с человеческим фактором. При обнаружении объектов на малых удалениях потеря времени до момента реализации противодействия критична, и даже несколько секунд могут играть решающую роль в определении победившей стороны по итогам тактического взаимодействия.

Главным техническим ограничением современных БПЛА в преодолении больших расстояний является двигатель. Современные двигатели (например, изделие MD550) позволяют достичь крейсерской скорости до 200 км/ч и преодолеть дистанцию до 2000 км. Если использовать в качестве средства перехвата БПЛА типа DJI Matrice 600 или Mavic-3, время подъема на заданную высоту (до 5 км) при скорости набора высоты до 29 км/ч, время выхода на линейный участок наведения будет составлять порядка 10 минут. При скорости полета средства перехвата до 72 км/ч и выполнении требования по перехвату на удалении от РЛС не менее 1 км, обнаружение высокоскоростного БПЛА должно быть обеспечено на удалении не менее чем 20 км. Например, в гексакоптере CZ960 Copterzone, представленном на рисунке 6, измеренная величина ЭПР составляет порядка 0,1 м<sup>2</sup> (в зависимости от ракурса наблюдения) [15]. Это достигается применением современных технологий снижения заметности и специальных покрытий.



Рисунок 6 – Гексакоптер CZ960 Copterzone

Следовательно, возникает необходимость повышения мощности излучения разработанных РЛС с учетом возможности применения при проектировании БПЛА специальных радиопоглощающих покрытий.

## **Комплексы охранных систем на базе унифицированных твердотельных когерентных РЛС**

Конструктивная особенность применяемых унифицированных твердотельных когерентных РЛС X-диапазона заключается в минимизации массо-габаритных характеристик радиолокационного модуля с использованием пространства внутри него для установки необходимых блоков и узлов, а также волноводно-распределительной системы, модулей управления фазой и волноводов бегущей волны с поворотом на 90 градусов. Такая «П-образная» конструкция помимо отсутствия превалирующих размеров обеспечивает наличие свободного объёма внутри радиолокационного модуля, включающего антенную решетку, для размещения аппаратуры и обеспечивает определённую жёсткость даже без использования дополнительных каркасных элементов.

При моноблочном построении РЛС реализуются следующие преимущества, обеспечивающие мобильность комплекса охраны:

- существенно увеличивается производительность решения разведывательных задач комплексом за счет встроенного вычислителя;

- снижается время монтажа/демонтажа РЛС.

Наличие электронного сканирования в РЛС обеспечивает возможность практически мгновенного изменения положения луча диаграммы направленности (ДН) антенны из одного положения в любое другое и позволяет:

- останавливать луч ДН на объекте для решения задачи его классификации, используя алгоритм обученной нейронной сети;

– сопровождать объект наблюдения на траектории с целью разрешения неоднозначности параметров по дальности, либо скорости;

– организовать псевдослучайный обзор пространства для обеспечения помехоустойчивости функционирования РЛС;

– сопровождать высокоскоростные и высокоманевренные объекты;

– увеличить надёжность РЛС за счет отсутствия механического управления в одной плоскости.

Эти возможности позволяют повысить качество функционирования и оперативность смены позиции комплекса охраны.

Комплекс перехвата на базе РЛС «Арес-МВК», разработанный в инициативном порядке в ПАО «ЦНПО «Ленинец», является программируемым по широкому набору параметров: длительность, несущая частота, тип и закон внутриимпульсной модуляции, ширина сектора и скорость электронного сканирования луча ДН антенны и т.д. В сочетании с высокопроизводительной согласованной цифровой обработкой и навигационной поддержкой обеспечивается реализация перечня возможных режимов работы РЛС, в том числе с высокой помехоустойчивостью. Внешний вид РЛС «Арес-МВК» представлен на рисунке 7.





Рисунок 7 – Радиолокационная станция «Арес-МВК»

Комплекс перехвата на базе трехкоординатной РЛС «Арес-МВК» секторного обзора, разработанный в инициативном порядке в ПАО «ЦНПО «Ленинец», с механическим приводом в вертикальной плоскости и электронным сканированием луча ДН антенны в горизонтальной плоскости предназначен для:

- радиолокационного наблюдения (обнаружения и определения параметров движения) наземных и надводных объектов;
- ведения радиолокационного обнаружения и распознавания воздушных объектов, в том числе малоразмерных.

Малые габариты и вес, наличие автономного источника питания, позволяют монтировать её на любом подходящем месте, а также на любую подвижную платформу (автомобиль, прицеп). Мобильная РЛС X-диапазона «Арес-МВК» может обеспечивать комплексу охраны обнаружение объектов с малыми ЭПР на траектории полета в режиме разведки старта, определение их скорости и отклонения траектории полета [7].

Комплекс перехвата на базе переносной трехкоординатной станции кругового обзора РЛС «Марс-2» решает задачи обнаружения и определения параметров движения воздушных объектов в режиме реального времени и способен обнаруживать малоразмерные воздушные объекты, представляющие угрозу охраняемым объектам по периметру круговой зоны обзора. Внешний вид РЛС «Марс-2» представлен на рисунке 8.



Рисунок 8 – Радиолокационная станция «Марс-2»

Благодаря энергопотенциалу и соответствующей математической обработке применение РЛС «МАРС-2» в комплексе охраны позволяет решать задачи обнаружения как в режиме кругового обзора, так и в секторном без использования механического привода, что расширяет функциональные возможности комплекса охраны.

### **Применение нейронной сети для распознавания воздушных объектов**

В математической модели распознавания образов необходимо учитывать не только случайные, но и реальные неопределенности, как по отношению выбранных признаков, так и по отношению технических характеристик средств распознавания и

условий функционирования [16]. Характеристики наблюдения определяются оценкой геометрических и контрастных характеристик изображения обнаруженного объекта, размеров кадра и времени на решение задачи [17].

Для проведения экспериментальных исследований была использована РЛС с активной фазированной антенной решеткой. Режим работы РЛС в остановленном луче позволил получить спектры отраженного сигнала от БПЛА, который удерживался оператором в луче. Спектры от птиц были получены за счет кратковременного их попадания в луч в ходе записи сигналов от БПЛА. Таким образом была сформирована база знаний для обучения нейронной сети. Полученные спектры сигналов подвергались первичной обработке для выделения полезного сигнала над уровнем шума, цифровой обработке, фильтрации и записи в файл.

Из полученных файлов формировались характеристические изображения (окна), содержащие спектр отраженного сигнала. Это позволяет реализовать алгоритмы распознавания изображений по характеристическим областям с помощью нейронной сети [18, 19]. Для распознавания изображений использовалась свёрточная нейронная сеть, собранная при помощи открытой библиотеки TensorFlow. На вход нейронной сети подавались изображения разрешением 101x21 и 51x1 пикселей, сохраненные в 255 градациях серого (графическое представление спектра отраженного сигнала). На рисунке 9 представлена функциональная схема разработанной нейронной сети.

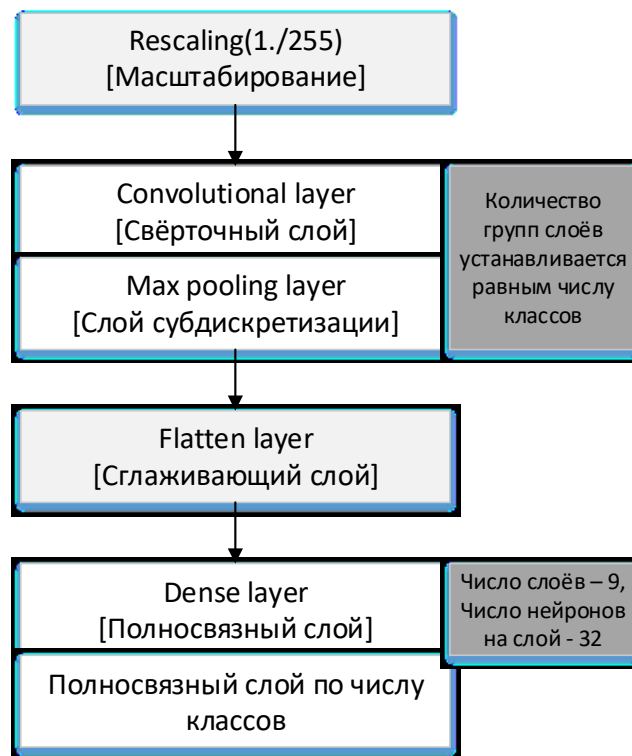


Рисунок 9 – Функциональная схема нейронной сети классификации изображений

Первый слой сети: Rescaling layer, представляет собой слой масштабирования.

Данный слой позволяет домножать исходные данные на произвольное число, то есть выполнить нормировку входных значений. В нашем случае значения пикселей были умножены на  $1/255$ , что позволило перейти от значений в диапазоне 0-255 к значениям в диапазоне 0-1.

Далее использованы последовательно два слоя: Convolutional и Max Pooling.

Слой Convolutional является свёрточным слоем, который выполняет пространственную свёртку изображений. Назначение свёрточного слоя заключается в обеспечении перехода от полноценного изображения к набору характеристических областей изображения. В качестве активационной функции данного слоя применяется традиционная функция ReLU (Rectified Linear Unit), формульная зависимость которой может быть записана как  $f(z) = \max(0, z)$ . Чтобы сохранить

выходные размеры изображения такими же, как входные, недостающие пиксели заполняются нулями. Для этого в функции ReLU параметру padding установлено значение “same”.

Следующий слой Max Pooling (субдискретизации) предназначен для уменьшения размера входного изображения путём уплотнения групп пикселей единым значением. Далее следует слой Flatten (сглаживающий), который конвертирует входной n-мерный массив в одномерный. Затем применяются Dense-слои (полносвязные). Их назначение – применение активационной функции ReLU к входным значениям. Группа полносвязных слоёв заканчивается слоем с количеством нейронов, равным количеству распознаваемых объектов.

Для работы с файлами, представляющими входные данные в виде массивов чисел, нейронная сеть была изменена (рисунок 10).

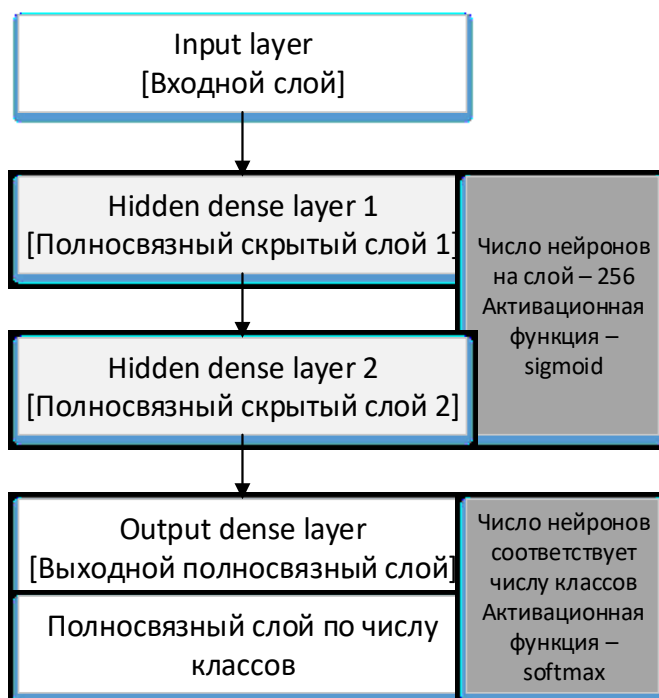


Рисунок 10 – Функциональная схема нейронной сети классификации массивов чисел

Входной слой имеет размерность, равную размеру входного числового массива.

Следующие за ним скрытые полносвязные слои применяют ко входным данным активационную сигмоидальную функцию

$$F(x) = \frac{e^x}{e^x + 1}.$$

Выходной слой, размерность которого соответствует количеству классов (в нашем случае 4), применяет для классификации функцию softmax:

$$z = w^T x - \theta,$$

где  $x$  – вектор-столбец признаков объекта,  $w^T$  – транспонированная матрица весовых коэффициентов признаков,  $\theta$  – вектор-столбец с пороговыми значениями.

Для оценки качества обучения нейронной сети с помощью библиотеки TensorFlow по каждому типу входных данных были получены кривые ошибок распознавания для обучающей и контрольной выборок по методам средней абсолютной ошибки (Mean Absolute Error, MAE) и средней абсолютной масштабированной ошибки (Mean Absolute Scaled Error, MASE), которые представлены на рисунках 11-13.

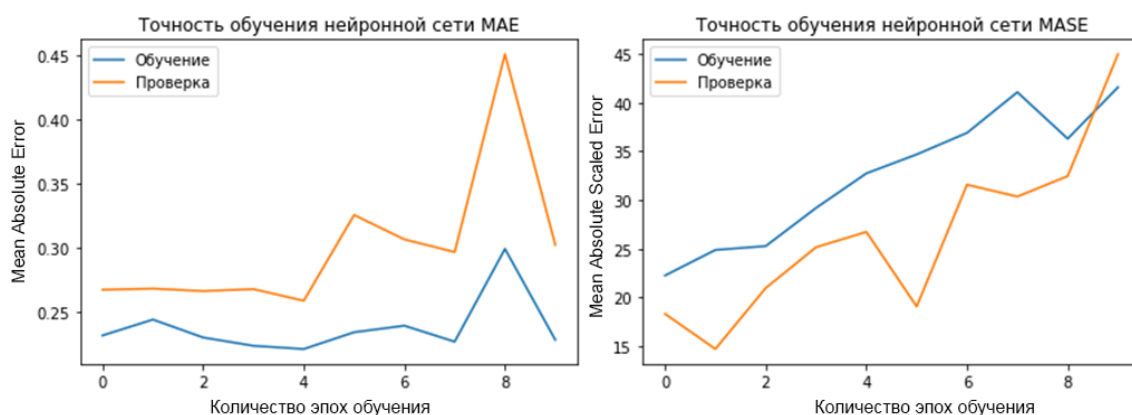


Рисунок 11 – Кривые ошибок для выборки из PNG-файлов разрешением 101\*11 пикс.

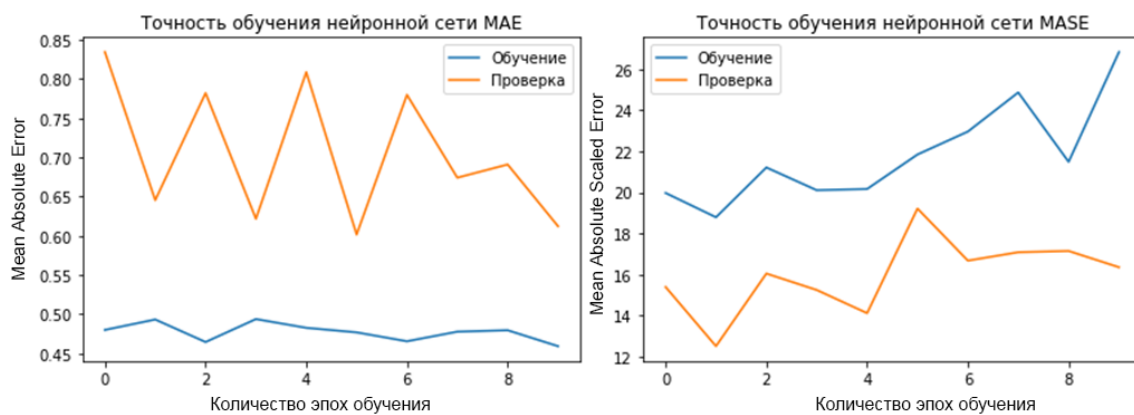


Рисунок 12 – Кривые ошибок для выборки из PNG-файлов разрешением 51\*1 пикс.

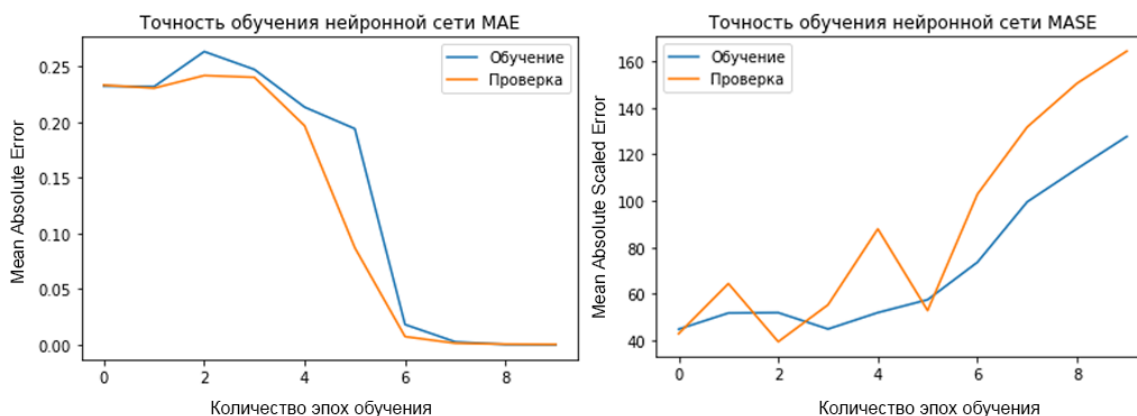


Рисунок 13 – Кривые ошибок для выборки, представленной в виде числовых массивов, размер окна 101\*11 точек

Анализ полученных в ходе экспериментальных исследований результатов свидетельствует о том, что размер окна изображения спектра отраженного сигнала не оказывает значительного влияния на вероятность распознавания между классами птиц и БПЛА. Достигнута вероятность распознавания объектов БПЛА/Птица не ниже 82%. Однако точность распознавания разных типов БПЛА между собой увеличивается при возрастании объёма исходных данных.

## **Выводы**

При реализации комплексов перехвата для обеспечения защиты охраняемых объектов от малоразмерных и малозаметных летательных аппаратов с использованием предлагаемого метода должны быть решены следующие задачи:

– разработаны переносные когерентные РЛС, способные обнаруживать малоразмерные БПЛА;

– внедрена обученная нейронная сеть, позволяющая с высокой эффективностью решать задачу классификации обнаруживаемых объектов (БПЛА/птица);

– осуществлена интеграция в РМО РЛС алгоритма управления средством перехвата;

– разработан алгоритм, позволяющий навести объект перехвата в точку перехвата автоматически с контролем результата.

Современная тенденция увеличения веса полезной нагрузки специализированных БПЛА разведывательного и поражающего действия [20] приводит к росту значений их ЭПР, что позволит повысить дальность обнаружения с помощью рассмотренных в статье РЛС и создать благоприятные условия для их перехвата. Применение более мощных двигателей и увеличение скорости полета воздушных объектов усложнит решение задачи перехвата и потребует дальнейшего развития РЛС и сопутствующих технологий.

## **Список источников**

1. Дмитриев В.И., Звонарев В.В., Лисицын Ю.Е. Методика обоснования рациональных способов управления беспилотным летательным аппаратом // Труды



МАИ. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116566>. DOI: [10.34759/trd-2020-112-16](https://doi.org/10.34759/trd-2020-112-16)

2. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Наукоедение. 2017. Т. 9. № 1. С. 1–7.

3. Massey K., Gaeta R. Noise Measurements of Tactical UAVs // 16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. DOI:[10.2514/6.2010-3911](https://doi.org/10.2514/6.2010-3911)

4. Макаренко С.И., Тимошенко А.В., Васильченко А.С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105

5. Горбулин В.И., Ходор М.А. Методика распределения полей зрения средств наблюдения в зоне ответственности // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=9342>

6. Naresh S., Dr.V. Ravi. Aerodynamic Characteristic Analysis of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) By Using CFD // International Journal for research in applied science and engineering technology, 2016, vol. 4, issue VIII, pp. 512-518.

7. Сидоренко К.А. Мобильная радиолокационная станция. Патент RU2729704С1 РФ, опубл. 2020-08-11.

8. Сенцов А.А., Поляков В.Б., Дмитриев В.Ф. Комплекс мобильных радиолокационных станций внешнетраекторных измерений // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 9. С. 31-36. DOI: [10.21778/2218-5453-2019-9-31-36](https://doi.org/10.21778/2218-5453-2019-9-31-36)
9. Сенцов А.А., Поляков В.Б. Технология построения высокоинформативных радиолокационных станций // Международный форум «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (Санкт-Петербург, 04 марта 2019): сборник тезисов. - СПб.: ГУАП, 2019. С. 158-160.
10. Torvik B., Olsen K. E., Griffiths H. Classification of Birds and UAVs Based on Radar Polarimetry // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, vol. 13, no. 9, pp. 1305-1309. DOI:[10.1109/LGRS.2016.2582538](https://doi.org/10.1109/LGRS.2016.2582538)
11. Sainath T., Weiss R., Wilson K. et al. Multichannel Signal Processing With Deep Neural Networks for Automatic Speech Recognition // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2017, pp. 965-979. DOI:[10.1109/TASLP.2017.2672401](https://doi.org/10.1109/TASLP.2017.2672401)
12. Shimamura T., Nguyen N. Autocorrelation and double autocorrelation based spectral representations for a noisy word recognition system // INTERSPEECH 2010, 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association, 2010, pp. 1712-1715. DOI:[10.21437/Interspeech.2010-492](https://doi.org/10.21437/Interspeech.2010-492)
13. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Gladkii N.A. Electronic Methods to Protect Unmanned Aerial Vehicles from Seizing Control // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018, pp. 331-334. DOI: [10.1109/WECONF.2018.8604463](https://doi.org/10.1109/WECONF.2018.8604463)

14. Y.-M. Kwon, J. Yu, B.-M. Cho et al. Empirical analysis of MAVLink protocol vulnerability for attacking unmanned aerial vehicles // IEEE Access, 2018, vol. 6, pp. 203–212. DOI:[10.1109/access.2018.2863237](https://doi.org/10.1109/access.2018.2863237)
15. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М. и др. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75662>
16. Гусейнов А.Б., Маховых А.В. Структурно-параметрический синтез рационального бортового распознающего устройства в составе беспилотного летательного аппарата // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=74833>
17. Сельвесюк Н.И., Веселов Ю.Г., Гайденов А.В., Островский А.С. Оценка характеристик обнаружения и распознавания объектов на изображении от специальных оптико-электронных систем наблюдения летного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100782>
18. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Kostenko D.A. Application of cognitive technologies in solving the recognition task // XXIV International Conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2022), Saint-Petersburg, Russia, 2022, pp. 1-4. DOI:[10.1109/WECONF55058.2022.9803328](https://doi.org/10.1109/WECONF55058.2022.9803328)  
DOI:[10.1109/WECONF55058.2022.9803328](https://doi.org/10.1109/WECONF55058.2022.9803328)
19. Sentsov A.A., Petrov I.D., Ivanov S.A. Feature extraction and recognition of aerial objects using echo signals received by radar // XXIII International conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems»

(WECONF-2021), Saint-Petersburg, Russia, 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470565

20. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. – М.: Стратегические приоритеты, 2016. – 676 с.

## References

1. Dmitriev V.I., Zvonarev V.V., Lisitsyn Yu.E. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=116566>. DOI: 10.34759/trd-2020-112-16

2. Teodorovich N.N., Stroganova S.M., Abramov P.S. *Naukovedenie*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 1–7.

3. Massey K., Gaeta R. Noise Measurements of Tactical UAVs, *16th AIAA / CEAS Aeroacoustics Conference*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010. DOI:10.2514/6.2010-3911

4. Makarenko S.I., Timoshenko A.V., Vasil'chenko A.S. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2020, no. 1, pp. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105

5. Gorbulin V.I., Khodor M.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=9342>

6. Naresh S., Dr.V. Ravi. Aerodynamic Characteristic Analysis of UAV (Unmanned Aerial Vehicle) By Using CFD, *International Journal for research in applied science and engineering technology*, 2016, vol. 4, issue VIII, pp. 512-518.

7. Sidorenko K.A. *Patent RU2729704C1 RF*, 2020-08-11.

8. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Dmitriev V.F. *Voprosy radioelektroniki*, 2019, no. 9, pp. 31-36. DOI: 10.21778/2218-5453-2019-9-31-36

9. Sentsov A.A., Polyakov V.B. *Mezhdunarodnyi forum «Metrologicheskoe obespechenie innovatsionnykh tekhnologii»*: sbornik tezisov. Saint Petersburg, GUAP, 2019, pp. 158-160.
10. Torvik B., Olsen K. E., Griffiths H. Classification of Birds and UAVs Based on Radar Polarimetry, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, vol. 13, no. 9, pp. 1305-1309. DOI:10.1109/LGRS.2016.2582538
11. Sainath T., Weiss R., Wilson K. et al. Multichannel Signal Processing With Deep Neural Networks for Automatic Speech Recognition, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 2017, pp. 965-979. DOI:10.1109/TASLP.2017.2672401
12. Shimamura T., Nguyen N. Autocorrelation and double autocorrelation based spectral representations for a noisy word recognition system, *INTERSPEECH 2010, 11th Annual Conference of the International Speech Communication Association*, 2010, pp. 1712-1715. DOI:10.21437/Interspeech.2010-492
13. Sentsov A.A., Polyakov V.B., Gladkii N.A. Electronic Methods to Protect Unmanned Aerial Vehicles from Seizing Control, *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2018, pp. 331-334. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604463
14. Y.-M. Kwon, J. Yu, B.-M. Cho et al. Empirical analysis of MAVLink protocol vulnerability for attacking unmanned aerial vehicles, *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 203–212. DOI:10.1109/access.2018.2863237
15. Ananenkov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M. et al. *Trudy MAI*, 2016, no. 91. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75662>
16. Guseinov A.B., Makhovykh A.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74833>

17. Sel'vesyuk N.I., Veselov Yu.G., Gaidenkov A.V., Ostrovskii A.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100782>
18. Sentsov A.A., Ivanov S.A., Kostenko D.A. Application of cognitive technologies in solving the recognition task, *XXIV International Conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2022)*, Saint Petersburg, Russia, 2022, pp. 1-4. DOI:10.1109/WECONF55058.2022.9803328
19. Sentsov A.A., Petrov I.D., Ivanov S.A. Feature extraction and recognition of aerial objects using echo signals received by radar, *XXIII International conference «Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems» (WECONF-2021)*, Saint Petersburg, Russia, 2021, pp. 1-4. DOI: 10.1109/WECONF51603.2021.9470565
20. Koshkin R.P. *Bespilotnye aviatsionnye sistemy* (Unmanned aircraft systems), Moscow, Strategicheskie priority, 2016, 676 p.

Статья поступила в редакцию 20.02.2023

Одобрена после рецензирования 06.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 20.02.2023; approved after reviewing on 06.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023