

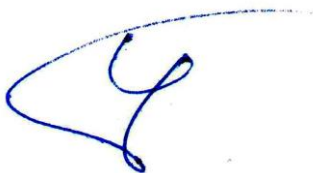
Чеканов Константин Александрович

**АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ
ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОСАДКИ
БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА НЕОБОРУДОВАННЫЕ
ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНЫЕ ПОЛОСЫ С ПОМОЩЬЮ
ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



МОСКВА – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Лукиянов Вадим Викторович**, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Официальные оппоненты: **Кулик Сергей Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры компьютерных систем и технологий (№12) института интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ.

Кулабухов Владимир Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, главный конструктор по инновационным проектам ТН-17 АО МНПК «Авионика» им. О. В. Успенского.

Ведущая организация: Акционерное общество Институт Авиационного Приборостроения «Навигатор» (АО «Навигатор»).

Защита состоится «26» мая 2026 г. в 14 час 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613М.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <https://www.bmstu.ru/>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.331.14,
кандидат технических наук,
доцент

В.В. Глазков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Диссертационная работа посвящена исследованию задачи информационного обеспечения автоматической посадки беспилотного воздушного судна (БВС) на взлётно-посадочную полосу (ВПП) с помощью системы технического зрения (СТЗ). Разработанное решение предназначается для использования на БВС самолётного типа среднего и более класса.

Основным средством для определения местоположения БВС на всех этапах полёта является спутниковая навигационная система (СНС). Она имеет высокую точность (особенно СНС в дифференциальном режиме), однако подвержена влиянию помех. Компактным и автономным решением этой проблемы может быть система технического зрения: БВС оборудуется видеокамерой и путём анализа, получаемого от неё изображения, вычисляется комплексная навигационная оценка.

Для определения собственных координат местоположения в пространстве, на изображении, получаемом с камеры, требуется идентифицировать объекты с заранее известными координатами. С технической точки зрения, навигация на этапе посадки может осуществляться путём распознавания инфракрасных (ИК) маркеров или распознавания контуров ВПП.

В первом случае около ВПП устанавливаются ИК-маркеры, координаты которых определяются с высокой точностью и сохраняются в бортовое программное обеспечение (ПО) БВС. Такие контрастные ориентиры легко детектируются на изображении, а затем положение камеры по отношению к ним определяется с помощью метода на основе фотограмметрии – «Perspective-n-Point (PnP)» (с англ. «Перспектива n-го числа точек»). Использование мультиспектральной камеры для детектирования ориентиров, значительно снижает зависимость распознавания от погодных условий. Большой вклад в развитие такого способа посадки внесли Бондарев В. Г., Лопаткин Д. В.

Несмотря на достоинства описанного способа, его применение требует усложнения наземной инфраструктуры и дополнительного штата сотрудников для её обслуживания. Распознавание контуров ВПП – это более сложный алгоритм, в том числе из-за влияния погоды и степени освещённости (времени суток), однако является более универсальным подходом и может применяться на полностью необорудованных аэродромах. При распознавании ВПП и расчёте собственных координат с помощью «PnP», в качестве точек с априорно известными координатами выступают углы полосы – информация о них содержится в аэронавигационных атласах. В развитие алгоритмов распознавания ВПП среди российских учёных внесли вклад Визильтер Ю. В., Выголов О. В., Логвин А. И., а среди иностранных – Florian Holzapfel, Chinmaya Mishra, Christoph Krammer.

Посадка крылатого БВС идентична посадке пилотируемого самолёта, поэтому для обеспечения её стабилизированного характера целесообразно придерживаться нормам и правилам, установленным Международной организацией

гражданской авиации (ICAO – International Civil Aviation Organization). ICAO предъявляет высокие требования по дальности установления визуального контакта с ВПП, которые не позволяют использовать разработанные к настоящему времени алгоритмы распознавания на всех этапах посадки.

Усовершенствовать алгоритмы распознавания ВПП можно за счёт применения искусственного интеллекта (ИИ), в частности, нейросетевой модели обучения, вместо классических методов технического зрения. Главной проблемой такого подхода может стать низкое быстродействие нейронных сетей. Однако к настоящему времени уровень развития цифровой техники позволяет ускорить их за счёт использования графических ядер во встраиваемой системе.

На основе вышеизложенного можно сформулировать основные цели и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмического обеспечения системы вычисления комплексной навигационной информации беспилотного воздушного судна на этапе посадки, использующего данные автономных измерительных средств (видеокамера, БИНС) для повышения точности позиционирования и дальности обнаружения взлётно-посадочной полосы.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработать метод расчёта допустимых отклонений от глиссады, учитывающий размеры ВПП, который на основе размера погрешности средства измерения координат позволяет оценить возможность его применения в автоматической посадке.
2. Разработать алгоритм распознавания ВПП на видеоизображении, имеющий повышенную дальность распознавания в сравнении с существующими алгоритмами. Проработать несколько вариантов исполнения алгоритма. Обеспечить его работу в реальном времени.
3. Разработать фотограмметрический алгоритм решения задачи визуального позиционирования, удовлетворяющий требованиям к допустимым отклонениям от глиссады.
4. Разработать алгоритм оценки комплексной навигационной информации, необходимой для управления БВС по измерениям координат, полученных методом визуального позиционирования.
5. Провести экспериментальное исследование разработанных алгоритмов, включающее этапы имитационного, полунатурного моделирования и натурного испытания.

Объектом исследования является БВС самолётного типа, оборудованный оптико-электронной системой, который совершает посадку на взлётно-посадочную полосу.

Предметом исследования являются алгоритмы и методы информационного обеспечения навигации БВС на этапе посадки, реализованные с помощью автономных средств измерения.

При решении поставленных задач в диссертации использовались методы: системный анализ, глубокое обучение, перспективные преобразования, поисковые алгоритмы, техническое зрение, численное решение дифференциальных уравнений, механика полёта, классические методы теории автоматического управления, объектно-ориентированное программирование, имитационное и полунатурное моделирование.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан алгоритм распознавания контура ВПП на видеоизображении, использующий более инвариантный признак, чем линейные элементы – ключевые точки. По сравнению с аналогами алгоритм имеет большую устойчивость к оптическим искажениям контура, большую дальность распознавания, обеспеченную применением нейронной сети YOLOv8, а также позволяет определять контуры нестандартной геометрии благодаря предложенному модифицированному методу оптимизации – рекурсивному методу ветвей и границ (РМВГ) с ранним исключением гипотез.

2. Разработан метод асинхронного распознавания ВПП, основанный на декомпозиции задачи распознавания на 3 универсальных подзадачи (инференс, поиск, трекинг), выполняемых в двух независимых потоках обработки информации, синхронизируемых через процедуру геометрической верификации. По сравнению с аналогами разработанный метод позволяет снизить общее время распознавания благодаря обработке видеопотока со скоростью вычислительно быстрой подзадачи – трекинга.

3. Разработан двухэтапный фотограмметрический алгоритм визуального позиционирования для БВС. По сравнению с аналогами алгоритм имеет большую точность благодаря применению разработанного метода комбинирования МНК, использующего углы ориентации от внешнего измерительного средства (БИНС) для вычисления начального приближения, а также уточнение с помощью нелинейного МНК.

4. Разработан алгоритм оценки комплексной навигационной информации на основе расширенного фильтра Калмана (РФК). В отличие от прототипов, в алгоритме реализован механизм адаптации ковариационной матрицы измерений, параметры которой нелинейно зависят от дальности до объекта съёмки. Это позволило более точно вычислить оценки параметров полёта.

Практическая значимость работы. Разработанные в рамках диссертационной работы алгоритмы распознавания ВПП и вычисления навигационной информации обеспечивают точность порядка 1 метра на входе в створ ВПП, что позволяет применять их для автоматической посадки БВС на необорудованных аэродромах или в условиях подавления спутникового сигнала.

Предложен метод асинхронного распознавания ВПП, который позволяет выполнять распознавание с быстроедействием трекинга (вычислительно быстрой задачи), обеспечивая функционирование в реальном времени.

Разработанный метод обучения нейронных сетей для задач распознавания ВПП в кадре с помощью авиасимулятора позволяет автоматизировать создание

блока данных, готового к обучению. Такой метод может эффективно применяться исследователями для оперативной подготовки или дополнения, существующего набора синтетическими данными.

Материалы диссертационного исследования использованы в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, выполняемых АО «РПКБ».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Алгоритм распознавания ВПП, обеспечивающий поиск на изображении контура нестандартной геометрии и работающий на дальностях, превышающих аналоги.

2. Метод комбинирования МНК, обеспечивающий решение задачи визуального позиционирования в условиях физических ограничений, связанных с большими дальностями и малым числом априорных точек.

3. Метод обучения нейронной сети с использованием авиасимулятора, обеспечивающий автоматизированное создание набора обучающих данных для задачи распознавания ВПП.

4. Алгоритм оценки комплексной навигационной информации с применением РФК, который на основе визуального позиционирования обеспечивает расчёт навигационных параметров, необходимых в управлении.

5. Результаты экспериментального исследования, включающего имитационное моделирование, полунатурное моделирование и натурное испытание, который подтверждает основные теоретические положения диссертационной работы.

Достоверность результатов работы. Достоверность обеспечивается достаточным объёмом проведённых имитационного и полунатурного моделирования, а также натурным испытанием. В моделировании были задействованы авиасимулятор, встраиваемый вычислительный модуль с поддержкой графических ядер, который может быть установлен на борту БВС, а также полётный контроллер реального беспилотного авиационного комплекса (БАК). В натурном испытании был задействован легкомоторный самолёт с закреплённой экшен-камерой. Полученные результаты согласуются с известными опубликованными данными.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Юбилейная всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке», Москва, 2016; XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, 2020; XXII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием, Санкт-Петербург, 2020; XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства, Москва, 2021; XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства,

Москва, 2022; Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке», Москва, 2022; XXV Юбилейная конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием, Санкт-Петербург, 2023, где работа заняла первое место в секции «Беспилотный транспорт и робототехнические системы»; XXX Юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, 2023; V Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами», Москва, 2024; Конкурс «Молодые специалисты РПКБ», Раменское, 2024, где работа заняла первое место в секции «Программно-математическое обеспечение»; VI Всероссийская научно-техническая конференция «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами», Москва, 2025.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 научных работ, из них 6 статей, входящих в перечень ВАК на квартилях К1 и К2, 1 статья, индексируемая в базе Scopus, 11 работ в трудах конференций международного и российского уровня, а также зарегистрировано 4 программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все научные положения и результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его решающем вкладе в исследования, которые выполнялись совместно с учёными и специалистами МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 129 наименований. Текст работы изложен на 166 машинописных страницах, содержит 99 рисунков и 22 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе предложен метод оценки допустимой точности удержания глиссады, учитывающий размеры ВПП. Согласно методу, погрешность навигационной системы не должна превышать значения, указанные в Таблице 1. Таблица 1 – Допустимые отклонения от стандартной глиссады с наклоном 3°

Категория	Высота принятия решений (ВППР), м	Горизонтальное отклонение, м	Вертикальное отклонение, м
I	60	7,7	5,1
II	30	5,0	2,5
III	15	3,7	1,3

Обеспечение III категории означает стабилизированное планирование на протяжении всей глиссады, что в свою очередь, допускает возможность использования навигационной системы в автоматической посадке.

Анализ технических средств посадки подтвердил целесообразность использования технического зрения при посадке на необорудованные аэродромы. Анализ решений на основе технического зрения выявил, что необходимую точность (Таблица 1) обеспечивает метод на основе фотограмметрии – «Perspective-n-Point (PnP)» (с англ. «Перспектива n-го числа точек»). На основании проведённого анализа, методов системного анализа, а также выявленных недостатков в существующих навигационных системах, работающих на принципе распознавания ВПП, предлагается структура системы, показанная на Рисунке 1.

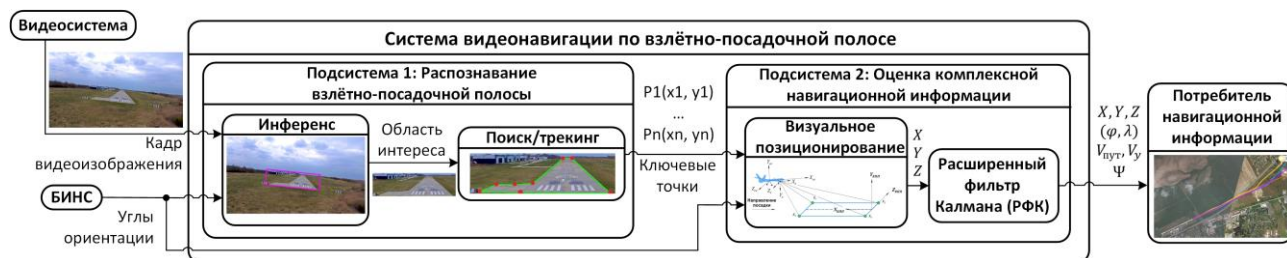


Рисунок 1 – Система видеонавигации по взлётно-посадочной полосе

Система видеонавигации разделена на две подсистемы, решающие независимые задачи: распознавание ВПП (Подсистема 1) и оценка комплексной навигационной информации (Подсистема 2). В Подсистеме 1 для локализации области интереса выполняется инференс нейронной сети «YOLO», а затем для выделения вершин контура ВПП выполняются алгоритмы поиска и трекинга. В Подсистеме 2 выполняются алгоритмы визуального позиционирования и РФК для формирования выходной комплексной навигационной оценки. Эффективность предлагаемой системы определяется качеством распознавания и точностью комплексной навигационной информации. Также была рассчитана минимальная дальность установления визуального контакта с ВПП (применительно к БВС – дальность распознавания), которая составила $D_{min} = 1430$ м. Проведённый анализ методов распознавания ВПП выявил, что алгоритмы с дальностью распознавания, значительно превышающей D_{min} отсутствуют, что обуславливает необходимость разработки нового метода.

Во второй главе рассмотрена задача распознавания ВПП на видеоизображении с использованием нейронной сети, а также предложен метод обучения нейронной сети с помощью авиасимулятора. Для распознавания ВПП предлагается следующий пошаговый алгоритм.

Шаг 1: в детектируемой области интереса применяются алгоритм Ши-Томаси для выделения всех контрастных углов. Детектор генерирует в заданной области облако особых точек. Среди этого облака необходимо определить точки, которые связаны с вершинами фигуры, аппроксимирующей контур ВПП.

Шаг 2: перепроектирование координат особых точек на «вид сверху», применяя к ним BEV-преобразование. Это действие выполняется с помощью матрицы гомографии H . Рассмотрен аналитический расчёт H :

$$P_{\exists 2} = HP_{\exists 1}$$

$$H = D_{\exists 2}^{K2} D_{K2}^{CB2} \bar{D}_{CB2}^{CB1} D_{CB1}^{K1} D_{K1}^{\exists 1}, \quad (1)$$

где $P_{\exists 1}, P_{\exists 2}$ – экранные координаты точки в положениях «1» (исходное) и «2» («вид сверху»), соответственно; $D_{K1}^{\exists 1}, D_{\exists 2}^{K2}$ – матрицы перехода между экранной системой координат (СК) и СК камеры; $D_{CB1}^{K1}, D_{K2}^{CB2}$ – матрицы перехода между связанной СК и СК камеры; $\bar{D}_{CB2}^{CB1}$ – матрица поворота со смещением из связанной СК «1» в связанную СК «2», которая определяется по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = D_g^{CB1} \begin{bmatrix} \cos \mu \\ \operatorname{tg} \varphi \\ 1 \\ \sin \mu \\ \operatorname{tg} \varphi \end{bmatrix} \Rightarrow \bar{D}_{CB2}^{CB1} = D_{CB2}^{CB1} + \begin{bmatrix} 0 \\ -b_1/b_2 \\ b_3/b_2 \end{bmatrix} \bar{n}^T D_g^{CB1}, \quad (2)$$

где D_g^{CB1} – матрица поворота из связанной в нормальную СК, которая зависит от углов крена и тангажа; μ, φ – азимут и угол места (вычисляются через экранные координаты); $\bar{n}^T = [0, 1, 0]$ – нормаль к поверхности ВПП.

Шаг 3: селекция ключевых точек с помощью РМВГ с ранним исключением гипотез. Ставится задача поиска n ключевых точек на «виде сверху», которые бы составляли вершины фигуры, наиболее близкой по геометрическим характеристикам к аппроксимирующей контуру ВПП. Для формализации контура определена операция векторизации:

$$\bar{x} = \operatorname{vec}(P_n = \{p_1 \dots p_n\}) = \left[\left\{ \frac{l_i}{l_{i+1}} \right\}_{i=1..n} ; \left\{ \arctg \left(\frac{l_{i+1y}}{l_{i+1x}} \right) - \arctg \left(\frac{l_{iy}}{l_{ix}} \right) \right\}_{i=1..n} ; \left\{ \frac{d_i}{d_{i+1}} \right\}_{i=1..n_d} \right], \quad (3)$$

где $\bar{x}$ – двумерный вектор из трёх признаков (эталонные отношения сторон, диагоналей и углы); P_n – множество вершин эталонной фигуры; n – число вершин, n_d – число диагоналей; l_i – длина i -й стороны, d_i – длина i -й диагонали. Определим функцию качества, значение которой лежит в диапазоне от 0 до 1:

$$\mu_i = \left(\frac{1}{n(n_d)} \right) \sum_{j=1}^{n(n_d)} \left[1 - \left| \frac{x_{ij} - \hat{x}_{ij}}{x_{ij}} \right| \right], \quad PF = pf(\bar{x}, \hat{\bar{x}}) = \left(\prod_{i=1}^k \mu_i \right)^{1/k}, \quad (4)$$

где $pf(\bar{x}, \hat{\bar{x}})$, PF – функция качества и её значение; $\hat{\bar{x}}$ – вектор признаков оцениваемой фигуры; μ_i – средняя оценка соответствия i -го признака эталону. Пусть задано множество m точек в двумерном пространстве: $P_m = \{p_1, \dots, p_m\}$; $P_m \in R^2$. Требуется найти множество $\hat{P}_n = \{p_1, \dots, p_n\}$; $\hat{P}_n \in P_m$, где n – число вершин ВПП, такое, что

$$\hat{\bar{x}}_n = \operatorname{vec}(\hat{P}_n), \bar{x}_n = \operatorname{vec}(P_n)$$

$$pf(\bar{x}_n, \hat{\bar{x}}_n) \rightarrow \max; \text{ Для } \forall i \neq n, pf(\bar{x}_n, \hat{\bar{x}}_i) = 0' \quad (5)$$

где P_n – эталонное множество, задающее искомую ВПП. Для решение поставленной задачи оптимизации разработан рекурсивный метод ветвей и границ с ранним исключением гипотез. Рекурсивная модификация позволяет применять этот метод для поиска контуров любой сложности. Идея метода состоит в увеличении быстродействия за счёт прерывания поиска на втором уровне вложенности, путём прогнозирования геометрических характеристик. Для $i = 1 \dots n$:

$$\begin{cases} (l_{i+1}, \psi_{i+1}) = \text{predict}(l_i, \psi_i, \bar{x}_i) = (l_i \cdot x_{i1}, \psi_i + x_{i2}) \\ p_{i+1}^{pr} = (p_{i_x}^{pr} + l_{i+1} \cos(\psi_{i+1}), p_{i_y}^{pr} + l_{i+1} \sin(\psi_{i+1})); P_n^{pr} = \{p_1^{pr} \dots p_n^{pr}\} \end{cases} \quad (6)$$

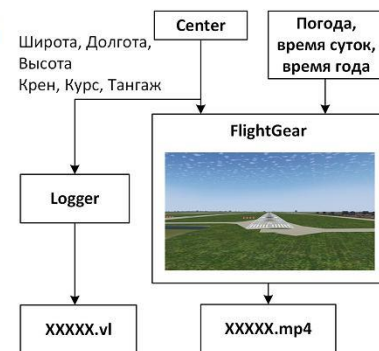
где ψ_i – направление i -го отрезка; $\text{predict}(l_i, \psi_i, \bar{x}_i)$ – функция прогноза с двумя значениями; p_i^{pr} , P_n^{pr} – i -ая точка и множество точек прогнозируемой фигуры. Гипотеза P_n^{pr} проверяется на условия минимальной площади и ориентации, а затем принимается решение об остановке и переходе к следующей гипотезе.

Метод обучения. Для задачи распознавания ВПП собрать обучающий набор, состоящий из реальных изображений, является практически нереализуемым требованием, связанным с высокой стоимостью полёта и ограничениями, действующими в крупных аэропортах. Поэтому обучающие данные целесообразно синтезировать с помощью авиасимулятора. В диссертационной работе для этого использован «FlightGear» (Рисунок 2, а). Результатом сбора данных являются видеоролики и файлы навигационной информации с привязкой к кадрам. Ручная разметка занимает много времени, поэтому разработано ПО, автоматизирующее этот процесс (Рисунок 2, б). В его основе лежит применение гомографии для вычисления экранных координат вершин ВПП в кадре. Разработанный метод обучения позволил собрать набор данных из 3000 изображений 10 виртуальных аэропортов. В ходе обучения достигнуты следующие показатели (Таблица 2):

Таблица 2 – Показатели точности, достигнутые в ходе обучения YOLOv8

Задача	Разрешение	mAP50	mAP50-95
Детекция	288x288	0,67	0,6
Сегментация	384x384	0,48	0,35
Оценка положения	416x416	0,71	0,64

а) Сбор



б) Разметка



Рисунок 2 – а) Сбор; б) Разметка

Метод асинхронного распознавания ВПП. Разработан для выполнения алгоритма, использующего YOLOv8, в реальном времени (Рисунок 3).

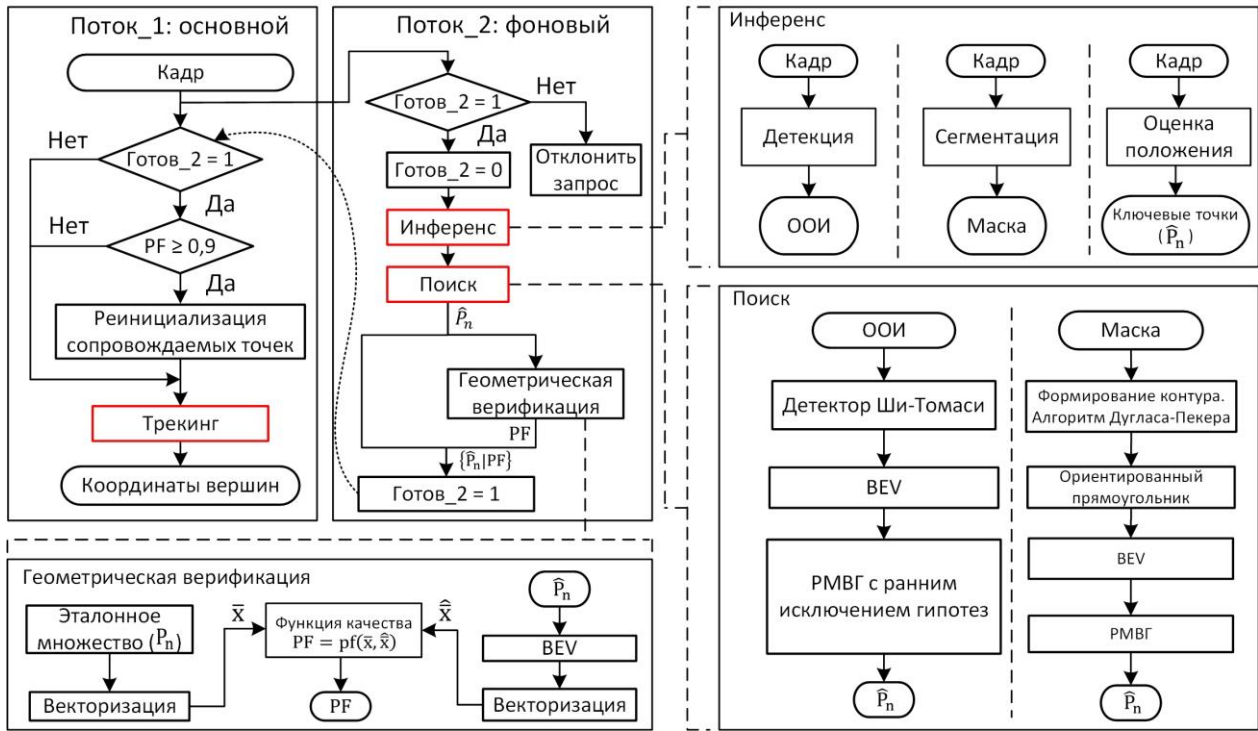


Рисунок 3 – Блок-схема метода асинхронного распознавания ВПП

Метод предполагает выполнение алгоритма распознавания в двух параллельных потоках обработки информации: основном и фоновом. Вычислительно затратная процедура инференса выполняется в фоновом потоке, а в основном считываются кадры и выполняет трекинг (вычислительно быструю процедуру). Синхронизация потоков обеспечена геометрической верификацией. Трекинг реализован методом Лукаса–Канаде с оценкой состояния фильтром Калмана.

В третьей главе описывается модифицированное решение задачи визуального позиционирования методом комбинирования МНК. Для вычисления позиции съёмки решается фотограмметрическая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{k_{x1} - c_x}{f_x} = \frac{a_{31}(K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + a_{32}(K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{33}(K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z)}{a_{11}(K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + a_{12}(K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{13}(K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z)} \\ \frac{c_y - k_{y1}}{f_y} = \frac{a_{21}(K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + a_{22}(K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{23}(K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z)}{a_{11}(K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + a_{12}(K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{13}(K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z)} \\ \vdots \\ \frac{k_{xn} - c_x}{f_x} = \frac{a_{31}(K_{Xn}^{\text{ВПП}} - X) + a_{32}(K_{Yn}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{33}(K_{Zn}^{\text{ВПП}} - Z)}{a_{11}(K_{Xn}^{\text{ВПП}} - X) + a_{12}(K_{Yn}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{13}(K_{Zn}^{\text{ВПП}} - Z)} \\ \frac{c_y - k_{yn}}{f_y} = \frac{a_{21}(K_{Xn}^{\text{ВПП}} - X) + a_{22}(K_{Yn}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{23}(K_{Zn}^{\text{ВПП}} - Z)}{a_{11}(K_{Xn}^{\text{ВПП}} - X) + a_{12}(K_{Yn}^{\text{ВПП}} - Y) + a_{13}(K_{Zn}^{\text{ВПП}} - Z)} \end{array} \right., \quad (7)$$

где n – число исследуемых точек; k_{xi}, k_{yi} – экранные координаты вершин контура ВПП; $K_{Xi}^{\text{ВПП}}, K_{Yi}^{\text{ВПП}}, K_{Zi}^{\text{ВПП}}$ – трёхмерные координаты исследуемых точек; $i = 1 \dots n$; c_x, c_y – экранные координаты центра фотоматрицы; f_x, f_y – фокусное расстояние; X, Y, Z – координаты позиции съёмки; $a_{11} \dots a_{33}$ – элементы матрицы

направляющих косинусов. Существующие методы решения «РпР» сталкиваются с физическими ограничениями при их применении для распознавания ВПП: малое число априорных точек и большие дальности (более 1000 м). Для преодоления этих ограничений применены следующие подходы:

- 1) увеличение числа априорных точек (реализуется с помощью распознавания вспомогательных точек контура – нестандартная геометрия ВПП);
- 2) интеграция дополнительной априорной информации в процедуру оценки положения объекта (углы ориентации от БИНС).

На первом этапе в систему вводятся углы ориентации от БИНС, что позволяет свести её к каноническому виду и решить с помощью линейного МНК:

$$\begin{cases} (a_{11}l_1 - a_{31}) \cdot (K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + (a_{12}l_1 - a_{32}) \cdot (K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + \\ \quad + (a_{13}l_1 - a_{33}) \cdot (K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z) = 0 \\ (a_{11}l_2 - a_{21}) \cdot (K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + (a_{12}l_2 - a_{22}) \cdot (K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + \\ \quad + (a_{13}l_2 - a_{23}) \cdot (K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z) = 0 \\ \vdots \end{cases} \quad (8)$$

где l_i ($i = 1 \dots 2n$) – левые части уравнений в системе (7).

$$\begin{cases} A_{11} \cdot (K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + A_{12} \cdot (K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + A_{13} \cdot (K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z) = 0 \\ A_{21} \cdot (K_{X1}^{\text{ВПП}} - X) + A_{22} \cdot (K_{Y1}^{\text{ВПП}} - Y) + A_{23} \cdot (K_{Z1}^{\text{ВПП}} - Z) = 0 \\ \vdots \end{cases} \quad (9)$$

где A_{ij} ($i = 1 \dots 2n, j = 1 \dots 3$) – левый сомножитель слагаемых в (8).

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}K_{X1}^{\text{ВПП}} & A_{12}K_{Y1}^{\text{ВПП}} & A_{13}K_{Z1}^{\text{ВПП}} \\ A_{21}K_{X1}^{\text{ВПП}} & A_{22}K_{Y1}^{\text{ВПП}} & A_{23}K_{Z1}^{\text{ВПП}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad (10)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} A_{11}K_{X1}^{\text{ВПП}} & A_{12}K_{Y1}^{\text{ВПП}} & A_{13}K_{Z1}^{\text{ВПП}} \\ A_{21}K_{X1}^{\text{ВПП}} & A_{22}K_{Y1}^{\text{ВПП}} & A_{23}K_{Z1}^{\text{ВПП}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}.$$

На втором этапе решение уточняется с помощью нелинейного МНК:

$$\begin{aligned} \bar{X}_i &= [X_i, Y_i, Z_i, \gamma_i, \vartheta_i, \psi_i]; \bar{X}_{i+1} = \bar{X}_i + \delta \bar{X}_i \\ \delta \bar{X}_i &= Q_i(\bar{l} - \bar{r}); Q_i = (J^T J)^{-1} J^T \end{aligned} \quad (11)$$

где $\bar{X}_i$ – вектор состояния; $\gamma_i, \vartheta_i, \psi_i$ – крен, тангаж, рыскание; $\delta \bar{X}_i$ – вектор нелинейных поправок; $\bar{r}$ – вектор правых частей уравнений системы (7); Q_i – матрица коэффициентов поправок; i – номер итерации; J – Якобиан. Исследование показало, что только при использовании БИНС среднего и высокого классов может быть достигнута точность, соответствующая III категории посадки (Таблица 1).

В четвёртой главе описано экспериментальное исследование разработанных алгоритмов.

Имитационное моделирование. Разработанные алгоритмы были реализованы в программном модуле, выполняемом на одноплатном компьютере «NVIDIA Jetson Nano», имеющем поддержку графических ядер для ускорения

работы нейронных сетей. На вход поступали видеоролики авиасимулятора, а на выходе регистрировались расчётные данные. Результаты оценки качества распознавания ВПП записаны в Таблице 3 (под качеством понимаются значения трёх показателей: точность («IoU», «Intersection Over Union» – с англ. «пересечение над объединением»), время выполнения и дальность распознавания).

Таблица 3 – Качество распознавания

Задача	Инференс, мс		Время (пол.), мс		Время (асинх.), мс	IoU	Дальность, м
	ЦПУ	ГПУ	ЦПУ	ГПУ			
Детекция	144	29	177	79	≈10	0,87	2950
Сегментация	402	78	408	81		0,81	2150
Оценка положения	324	70	324	70		0,82	2500

По совокупности достигнутых значений наилучший результат показал алгоритм на основе детекции. Точность метода комбинирования МНК оценивалась путём сравнения с геодезическим решением при распознавании контуров ВПП стандартной и нестандартной геометрии (Рисунки 4-5, Таблицы 4-5).

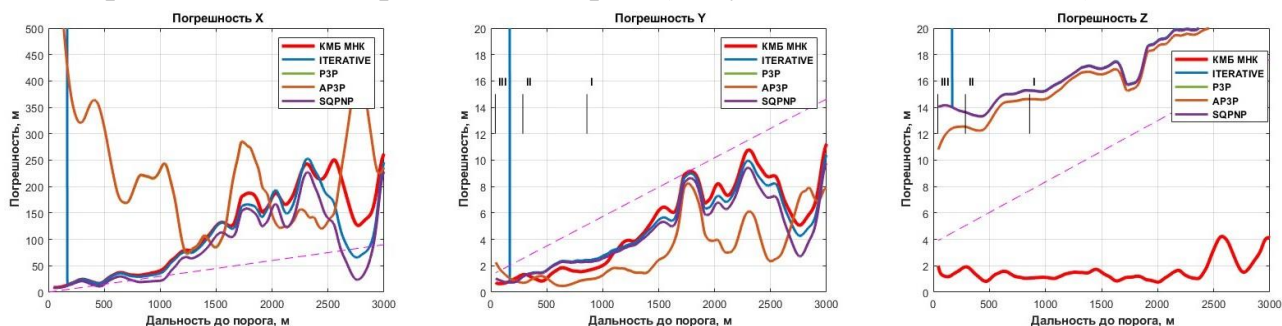


Рисунок 4 – Погрешность координат (контур стандартной геометрии)

Таблица 4 – Погрешность координат на ВПП (контур стандартной геометрии)

Метод	I (60 м)		II (30 м)		III (15 м)	
	Z, м	Y, м	Z, м	Y, м	Z, м	Y, м
«КМБ МНК»	1,07	1,63	1,91	1,32	2,00	0,75
«ITERATIVE»	15,29	2,44	13,64	1,17	—	—
«P3P»	14,62	0,96	12,53	0,71	10,81	2,25
«AP3P»	14,62	0,96	12,53	0,71	10,81	2,25
«SQPNP»	15,26	2,31	13,63	1,15	14,05	1,04

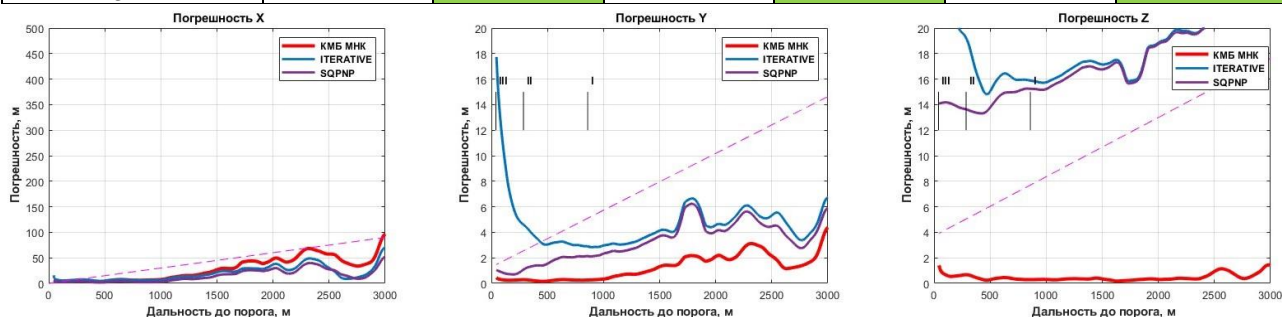


Рисунок 5 – Погрешность координат (контур нестандартной геометрии)

Таблица 5 – Погрешность координат на ВПП (контур нестандартной геометрии)

Метод	I (60 м)		II (30 м)		III (15 м)	
	Z, м	Y, м	Z, м	Y, м	Z, м	Y, м
«КМБ МНК»	0,29	0,26	0,68	0,28	1,44	0,45
«ITERATIVE»	15,88	2,90	19,24	4,61	48,80	17,74
«SQPNP»	15,24	2,13	13,63	1,07	14,10	1,05

Результаты моделирования показали, что только алгоритм комбинирования МНК удовлетворил требованиям для всех категорий точности посадки.

Полунатурное моделирование. Проводилось с использованием элементов БАК: полётный контроллер (на базе микроконтроллера «NanoPi R2S Plus»), ПО наземной станции управления и динамической модели движения. Для оценки полного состояния был применён РФК (Рисунок 7). Особенностью предложенной реализации является адаптивная матрица ковариации ошибки измерения (R), которая изменяется в зависимости от дальности до порога ВПП (Рисунок 6).

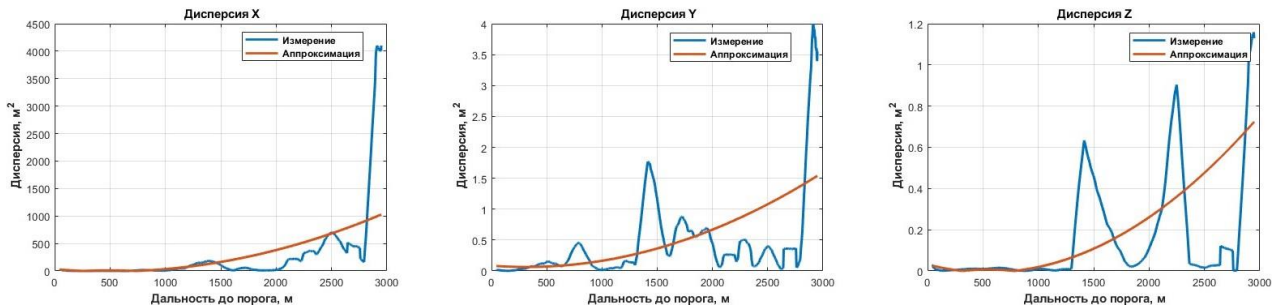


Рисунок 6 – Аппроксимация дисперсии шума измерения координат

На Рисунке 6 показаны дисперсия шума измерения и её аппроксимация полиномом 2-ой степени, полученная на основе выборки из 100 моделирований посадки. Такой подход позволил учесть снижение ошибки измерения координат, связанное с приближением к ВПП.

Модель процесса $\bar{X} = f(\bar{X}_0) = \begin{cases} X = X_0 + V_{пут} \cdot \cos(\Psi + \Psi_{ВПП}) \cdot \Delta t \\ Y = Y_0 + V_y \cdot \Delta t \\ Z = Z_0 + V_{пут} \cdot \sin(\Psi + \Psi_{ВПП}) \cdot \Delta t \\ V_{пут} = V_{пут0} \\ V_y = V_{y0} \\ \Psi = \Psi_0 \end{cases} \quad \begin{bmatrix} X_{изм} \\ Y_{изм} \\ Z_{изм} \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ V_{пут} \\ V_y \\ \Psi \end{bmatrix}$ $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cos(\Psi + \Psi_{ВПП})\Delta t & 0 & -V_{пут}\sin(\Psi + \Psi_{ВПП})\Delta t \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \sin(\Psi + \Psi_{ВПП})\Delta t & 0 & V_{пут}\cos(\Psi + \Psi_{ВПП})\Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	Ковариационные матрицы $Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10^{-2} \end{bmatrix}$ $R = \begin{bmatrix} v_x(D) & 0 & 0 \\ 0 & v_y(D) & 0 \\ 0 & 0 & v_z(D) \end{bmatrix}$	Процедура РФК $\bar{X}_{np} = f(\bar{X}_0)$ $P_{knp} = A P_{k-1} A^T + Q$ $K = \frac{P_{knp} C^T}{C P_{knp} C^T + R}$ $P_k = (I - KC) P_{knp}$ $\bar{X} = \bar{X}_{np} + K(\bar{z} - C \bar{X}_{np})$
--	--	---

Рисунок 7 – Основные параметры предложенного РФК

На Рисунке 7 $v_x(D)$, $v_y(D)$, $v_z(D)$ обозначены аппроксимирующие функции полинома 2-ой степени. Проведено полунатурное моделирование, в котором алгоритмы распознавания и оценки комплексной навигационной информации были реализованы в вычислительном модуле «Jetson Nano», получающем изображение из «FlightGear» и отправляющем оценку вектора состояния в полётный контроллер. Проведено 2 моделирования: для стандартной и нестандартной геометрий распознаваемого контура ВПП. Результаты показаны на Рисунке 8.

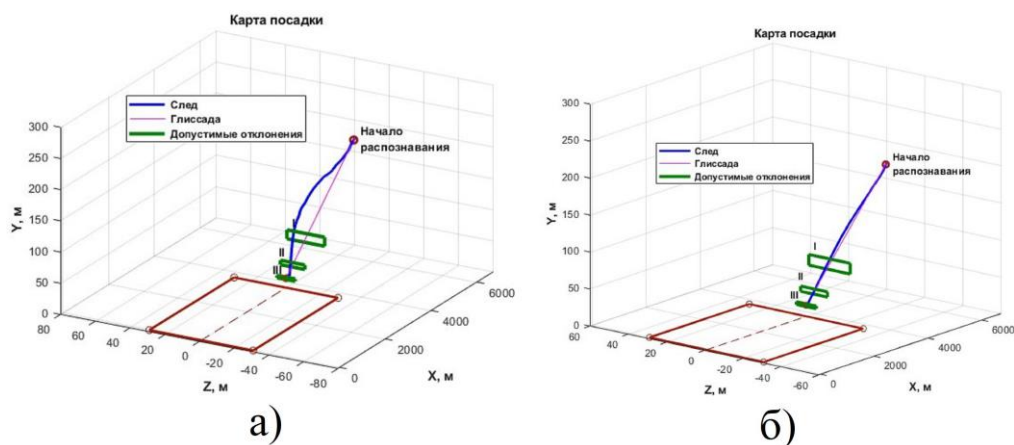


Рисунок 8 – Карта посадки при распознавании а) контура стандартной геометрии; б) контура нестандартной геометрии

Моделирование показало, что отклонения от глиссады в обоих случаях находятся в допустимых границах, однако при распознавании контура нестандартной геометрии траектория посадки была более стабильной.

Натурное испытание. Проводилось на легком одномоторном пилотируемом самолёте, на крыле которого была установлена экшен-камера «SJCAM SJ5000 X Elite». Данные об ориентации брались от внешней БИНС среднего класса точности. Рассчитанные траектории посадок показаны на Рисунке 9.



Рисунок 9 – Траектории посадок при распознавании: а) контура стандартной геометрии; б) контура нестандартной геометрии

В ходе испытания было выполнено 4 цикла взлёта-посадки. Усреднённые показатели, достигнутые в процессе каждой из посадок, записаны в Таблицу 6:

Таблица 6 – Показатели точности, достигнутые в натурном испытании

Тип контура	IoU	Дальность распознавания	I (60 м)		II (30 м)		III (15 м)	
			Z	Y	Z	Y	Z	Y
Стандартный	0,89	2994	3,1	3,7	1,8	2,4	1,3	1,2
Нестандартный	0,83	2083	3,0	3,3	2,5	2,3	1,2	1,1

В Таблице 6 все величины (кроме IoU) указаны в метрах. Полученные отклонения не выходят за допустимые пределы, подтверждая точность, достигнутую при имитационном и полунатурном моделировании, в соответствии с III категорией посадки.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен метод оценки допустимых отклонений от глиссады. В отличие от стандартных требований к зональной навигации ICAO, в предложенном методе вводится учёт размеров ВПП, что позволяет рассчитать допустимые отклонения индивидуально для каждой полосы.

2. Разработан алгоритм распознавания ВПП нестандартной геометрии на видеоизображении, основанный на использовании нейронной сети «YOLOv8», экстракции ключевых точек Ши-Томаси, BEV-преобразовании, PMBG с ранним исключением гипотез, а также оптическом трекинге KLT с ФК. На этапе имитационного моделирования разработанный алгоритм показал распознавание на дальности 2950 м, что превышает дальность распознавания аналогичных систем в 2 раза. Применение метода асинхронного распознавания обеспечило время выполнения на уровне 10 мс (NVIDIA «Jetson Nano»), что превышает время выполнения последовательной реализации в 7-8 раз.

3. Разработан двухэтапный фотограмметрический алгоритм визуального позиционирования для БВС, который благодаря применению разработанного метода комбинирования МНК, на этапе имитационного моделирования показал точность в среднем, превышающую аналоги на 9 м и 2 м по горизонтали и вертикали, соответственно. Достигнутый результат отвечает требованиям точности III категории посадки.

4. Для оценки комплексной навигационной информации разработан алгоритм на основе РФК, отличающийся от аналогов механизмом адаптации ковариационной матрицы измерений, нелинейно зависящей от дальности до объекта съёмки. Введение РФК в среднем обеспечило прирост точности в 11% по сравнению с прямым измерением. На этапе полунатурного моделирования автоматической посадки с привлечением элементов БАК среднее отклонение от глиссады составило 1,6 м и 0,6 м по горизонтали и вертикали, соответственно.

5. Проведено натурное испытание, в ходе которого была подтверждена дальность распознавания 3000 м, а также точность на входе в створ ВПП – 1,2 м и 1,1 м в боковом и вертикальном каналах, соответственно. Полученный результат превышает такие же показатели аналогичных систем в 2 раза по дальности распознавания и в 3 раза по точности.

Разработанное алгоритмическое обеспечение системы видеонавигации по ВПП может работать в контуре управления и обеспечить необходимую точность для автоматической посадки. Его эффективность подтверждена экспериментальным исследованием, результаты которого согласуются с другими научными результатами.

В дальнейшем планируется исследовать возможности отечественных микроконтроллеров со встроенными аппаратными средствами поддержки нейросетей, на предмет переноса в них разработанных алгоритмов и методов. Разработать для них ПО, реализующее предложенные алгоритмы распознавания ВПП и вычисления комплексной навигационной информации, а также провести пилотируемое испытание с навигационной системой на основе разработанного вычислительного модуля.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИС- СЕРТАЦИИ РАБОТ

1. Земляной Е. С., Чеканов К. А., Тарарыкин В. И., Чернов А. М., Гусев А. С. Унифицированный комплекс бортового оборудования для лёгких летательных аппаратов // Инженерная физика. 2019. №6. С. 47-50. (0,24 п.л. / 0,05 п.л.). DOI: 10.25791/infi zik.06.2019
2. Лукьянов В. В., Алексеев А. Н., Земляной Е. С., Чеканов К. А. Алгоритм директорного управления самолётом в режиме посадки // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. №11. С. 1-14. (0,81 п.л. / 0,4 п.л.). DOI: 10.18698/2308-6033-2020-11-2032
3. Лукьянов В. В., Алексеев А. Н., Земляной Е. С., Чеканов К. А. Методика оценки точности посадки БЛА на взлетно-посадочную полосу // Автоматизация. Современные технологии. 2022. №12. С. 551-554. (0,48 п.л. / 0,24 п.л.). DOI: 10.36652/0869-4931-2022-76-12-551-554
4. Лукьянов В. В., Алексеев А. Н., Земляной Е. С., Чеканов К. А. Автоматическая посадка крылатого БЛА по визуальным маркерам // Автоматизация. Современные Технологии. 2023. №3. С. 121-127. (0,96 п.л. / 0,48 п.л.). DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-3-121-127
5. Лукьянов В. В., Алексеев А. Н., Земляной Е. С., Чеканов К. А., Чебаков А. А. Оптимизация управления скоростью квадркоптера при полёте по маршруту // Автоматизация. Современные технологии. 2023. №5. С. 229-235. (0,84 п.л. / 0,42 п.л.). DOI: 10.36652/0869-4931-2023-77-5-229-234
6. A. N. Alexeev, E. S. Zemlyanyy and K. A. Chekanov, Solving the Problem of Unmanned Aerial Vehicle Automatic Runway Landing, 2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4 (0,24 п.л. / 0,12 п.л.). DOI: 10.23919/ICINS51816.2023.10168487
7. Чеканов К. А. Алгоритмы распознавания взлётно-посадочной полосы по видеоданным на основе нейронной сети при посадке беспилотного летательного аппарата // Гироскопия и навигация. 2025. №1. С. 36-51. (0,94 п.л.).
8. Бабиченко А. В., Земляной Е. С., Чеканов К. А. Моделирование задачи предотвращения столкновения в группе ЛА // Юбилейная всероссийская научно-техническая конференция Авиационные системы в XXI веке. М.: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2016. С. 194. (0,06 п.л. / 0,02 п.л.).
9. Лукьянов В. В., Чеканов К. А. Разработка и реализация алгоритмов директорного управления самолётом в режиме посадки // XLIV Академические чтения по космонавтике, Сборник тезисов. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. С. 185-187. (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).
10. Лукьянов В. В., Чеканов К. А. Разработка и реализация алгоритмов директорного управления самолётом // Материалы XXII конференции молодых ученых Навигация и управление движением с международным участием. СПб.: ГНЦ РФ АО Концерн ЦНИИ Электроприбор, 2020. С. 98-100. (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).

11. Лукьянов В. В., Чеканов К. А. Исследование точности внешнего ориентирования в задаче посадки БЛА по визуальным маркерам // XLV Академические чтения по космонавтике, Сборник тезисов. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2021. С. 411-412. (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).
12. Лукьянов В. В., Чеканов К. А. Автоматическая посадка лёгкого крылатого БЛА по визуальным маркерам // XLVI Академические чтения по космонавтике, Сборник тезисов. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2022. С. 523-525. (0,16 п.л. / 0,12 п.л.).
13. Алексеев А. Н., Чеканов К. А. Исследование точности определения координат в задаче посадки БЛА по визуальным маркерам // Тезисы докладов юбилейной Всероссийской научно-технической конференции Авиационные системы в XXI веке. М.: 2022. С. 273-274. (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).
14. Алексеев А. Н., Земляной Е. С., Чеканов К. А. Посадка крылатого беспилотного летательного аппарата на взлётно-посадочную полосу по особым точкам // Материалы XXV конференции молодых ученых Навигация и управление движением с международным участием. СПб.: ГНЦ РФ АО Концерн ЦНИИ Электроприбор, 2023. С. 26-28. (0,15 п.л. / 0,1 п.л.).
15. Алексеев А. Н., Земляной Е. С., Чеканов К. А. Решение позиционной задачи для автоматической посадки беспилотного летательного аппарата на взлётно-посадочную полосу с помощью технического зрения // XXX Юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов. СПб.: ГНЦ РФ АО Концерн ЦНИИ Электроприбор, 2023. С. 167-170. (0,24 п.л. / 0,16 п.л.).
16. Чеканов К. А. Алгоритмы выработки навигационной информации для автоматической посадки беспилотного летательного аппарата на необорудованные взлётно-посадочные полосы // Тезисы докладов V Всероссийской научно-технической конференции Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. М.: Издательская группа Круглый стол, 2024. С. 212-214. (0,12 п.л.).
17. Чеканов К. А. Алгоритмы распознавания взлётно-посадочных полос нестандартной геометрии в видеопотоке в реальном времени // VI Всероссийская научно-техническая конференция Моделирование авиационных систем. Тезисы докладов. М.: Издательская группа Круглый стол, 2025. С. 417-419. (0,12 п.л.).
18. Чеканов К. А., Зеленев Д. Ю. Применение фильтра Калмана для обработки собственных координат при посадке беспилотного летательного аппарата по видеоизображению // VI Всероссийская научно-техническая конференция Моделирование авиационных систем. Тезисы докладов. М.: Издательская группа Круглый стол, 2025. С. 138-139. (0,12 п.л. / 0,09 п.л.).
19. Земляной Е.С., Тарарыкин В.И., Тектов М.В., Чеканов К.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №23-1197. ФПО пилотажно-навигационного средства ПНС-1-2 /Правообладатель Акционерное общество Раменское приборостроительное конструкторское бюро. Заявка №001323; Заяв. 06.09.2023; Зарегистр. 07.09.2023; (Фонд интеллектуальной собственности).
20. Земляной Е.С., Тарарыкин В.И., Тектов М.В., Чеканов К.А. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №23-1198. ФПО индикатора циф-

рового интеллектуального ИЦИ-140К-2 /Правообладатель Акционерное общество Раменское приборостроительное конструкторское бюро. Заявка №001324; Заяв. 06.09.2023; Зарегистр. 07.09.2023; (Фонд интеллектуальной собственности).

21. Чеканов К. А. Свидетельство на программу Российской Федерации №2025685629. Программа поиска взлётно-посадочной полосы по ключевым точкам на изображении /Правообладатель Чеканов К. А. Заявка №2025684527; Заяв. 15.09.2025; Зарегистр. 25.09.2025; Бюл. №10. (РОСПАТЕНТ).

22. Чеканов К. А. Свидетельство на программу Российской Федерации №2025683154. Программа расчёта навигационного решения по видеоизображению взлётно-посадочной полосы /Правообладатель Чеканов К. А. Заявка №2025680170; Заяв. 01.08.2025; Зарегистр. 02.09.2025; Бюл. №9. (РОСПАТЕНТ).