МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «УДМУРТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ
Кафедра цифровых инженерных технологий

Направление подготовки
27.04.04 «Управление в технических системах»
Направленность
27.04.04.04 Автоматическое управление в робототехнических системах

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Практико-ориентированная)
на тему

«Система предиктивного управления и оптической навигации для автономной посадки БПЛА на подвижную платформу»

Работу выполнил
Студент группы ОМ-20.04.01.04-21
_____ А. А. Дмитриев
Научный руководитель
д.т.н., профессор
_____ В. М. Колодкин
Нормоконтроль ВКР
_____ Д. М. Варламова
Руководитель направления
д.т.н., профессор
_____ В. М. Колодкин
«__»_____ 2026г.

ВКР УдГУ

Ижевск 2026

Оглавление

Оглавление 2
ГЛОССАРИЙ 4
ВВЕДЕНИЕ 8
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОЙ ПОСАДКИ БПЛА 11
1.1 Особенности выполнения посадки БПЛА самолетного типа на подвижные платформы 11
1.2 Методы оптической навигации и машинного зрения в условиях отсутствия GNSS 13
1.3 Алгоритмы фильтрации и комплексирования навигационных данных 14
1.4 Системы автоматического управления траекторией сближения 16
1.4.1 Классические контуры управления и их алгоритмические ограничения 17
1.4.2 Интеграция модельно-предиктивного управления для генерации оптимальной глиссады 18
1.5 Обоснование выбранной архитектуры и постановка задачи исследования 19
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ 22
2.1 Системы координат и базовые кинематические преобразования 22
2.2 Нелинейная кинематическая и динамическая модель БПЛА. 24
2.2.1. Уравнения трансляционного движения 24
2.2.2. Уравнения вращательного движения 25
2.2.3. Внешние силы и моменты 26
2.3 Математическая модель движения посадочной платформы. 27
2.3.1. Кинематика движения платформы 27
2.3.2. Вектор состояния и интеграция с контуром управления 28
2.4 Архитектура низкоуровневого управления. 29
2.5 Моделирование подсистемы машинного зрения. 32
2.6 Комплексирование и фильтрация оптических измерений 34
2.7 Синтез высокоуровневого предиктивного регулятора и формирование виртуальной глиссады. 37
Выводы по второй главе 40
ГЛАВА 3. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ 43
3.1 Архитектура программного решения. 43
3.2 Аппаратное обеспечение. 44
3.3 Реализация среды математического моделирования динамики полета. 46
3.4 Программная реализация конвейера машинного зрения на базе библиотеки OpenCV. 49
3.5 Оптимизация в реальном времени: реализация MPC с использованием фреймворка CasADi. 51
3.6 Интеграция с физическим комплексом: асинхронное взаимодействие по протоколу MAVLink 54
Выводы по третьей главе 56
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ 58
4.1 Методика проведения вычислительных экспериментов в среде SITL 58
4.2 Тестирование алгоритмов оптической навигации. 59
4.3 Сценарий 1: Базовое наведение и посадка на равномерно движущуюся платформу. 61

ВКР УлГУ

4.4 Сценарий 2: Компенсация ветровых возмущений и турбулентности атмосферы. 63
Выводы по четвертой главе 67
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 69
ЛИТЕРАТУРА 71

ВКР УдГУ

ГЛОССАРИЙ

Термин / Аббревиатура	Полное наименование (для аббревиатур)	Определение и функциональное назначение в работе
6-DOF	Six Degrees of Freedom	Пространственное движение твердого тела с шестью степенями свободы (линейные и угловые координаты БПЛА).
Anti-windup clamping	—	Алгоритм защиты от интегрального насыщения, принудительно замораживающий накопление ошибки в ПИ-регуляторах при достижении актуаторами конструктивных лимитов.
Asyncio	—	Стандартная библиотека языка Python, применяемая для реализации асинхронного программирования и параллельного выполнения задач без блокировки основного потока.
Body Frame	—	Связанная система координат (ССО), начало которой совмещено с центром масс беспилотного летательного аппарата.
CasADi	—	Открытый программный фреймворк для символьного формулирования и быстрого решения задач нелинейного программирования и оптимизации в реальном времени.
Companion computer	—	Высокоуровневый бортовой микрокомпьютер (в работе — Raspberry Pi 4), используемый для выполнения ресурсоемких алгоритмов навигации и управления.
Constant Velocity (CV)	—	Кинематическая модель постоянной скорости, используемая в фильтре Калмана для непрерывной оценки и экстраполяции вектора состояния платформы.
EKF	Extended Kalman Filter	Расширенный фильтр Калмана; алгоритм комплексирования данных, обеспечивающий фильтрацию высокочастотного шума оптических измерений и экстраполяцию координат.

ВКР УлГТУ

Fallback	—	Механизм программного резервирования, фиксирующий последнюю успешную матрицу управления при вычислительной расходимости нелинейного решателя.
FOV	Field of View	Угловые размеры поля зрения бортовой камеры, удержание инфракрасных маркеров в котором выступает «жестким» ограничением при планировании траектории БПЛА.
GNSS / GPS	Global Navigation Satellite System / Global Positioning System	Глобальные навигационные спутниковые системы; в работе исключены из архитектуры ввиду их уязвимости к потере сигнала или преднамеренному подавлению.
IPOPT	—	Встроенный в CasADi нелинейный решатель методом внутренней точки (interior-point), адаптированный для задач жесткого реального времени.
IPPE	Iterative Pose and Proportion Estimation	Итеративный решатель обратной геометрической задачи, требующий устойчивого захвата минимум четырех копланарных точек для расчета позы платформы.
MAVLink	—	Стандартизированный аэрокосмический протокол обмена данными между бортовым микрокомпьютером верхнего уровня и низкоуровневым автопилотом.
MAVSDK	—	Специализированная библиотека, предоставляющая асинхронный интерфейс для отправки упреждающих команд управления и получения телеметрии по протоколу MAVLink.
MPC	Model Predictive Control	Модельно-предиктивное управление; высокоуровневый регулятор, рассчитывающий оптимальную виртуальную глиссаду на скользящем горизонте прогнозирования.
NED	North-East-Down	Нормальная земная система координат (ИСО), оси которой ориентированы на геодезический север, восток и вертикально вниз к центру Земли.

ВКР УлГУ

NLP	Nonlinear Programming	Нелинейное программирование; класс оптимизационных задач с нелинейными ограничениями и целевой функцией, решаемых в контуре предиктивного управления.
Offboard	—	Специализированный режим внешнего управления полетным контроллером, предназначенный для трансляции упреждающих команд от высокоуровневого MPC.
OpenCV	Open Source Computer Vision Library	Открытая библиотека компьютерного зрения, используемая в работе для реализации конвейера обработки визуальной информации и решения геометрических задач.
Pixhawk	—	Серийный полетный контроллер нижнего уровня, обеспечивающий «жесткий» реальный масштаб времени для стабилизации углов ориентации и воздушной скорости.
PnP	Perspective-n-Point	Обратная геометрическая задача определения относительного пространственного положения (6-DOF) объекта по двумерным пиксельным координатам его маркеров.
Python	—	Высокоуровневый объектно-ориентированный язык программирования, на котором полностью реализован кроссплатформенный программный стек системы.
Raspberry Pi 4	—	Одноплатный микрокомпьютер, используемый в качестве высокоуровневого бортового вычислителя для исполнения алгоритмов машинного зрения, EKF и MPC.
RTK	Real-Time Kinematic	Системы спутниковой навигации высокой точности (кинематика реального времени), использование которых целенаправленно исключено из разработанной архитектуры.
Setpoints	—	Целевые установки (команды управления), непрерывная отправка которых необходима для успешной активации и удержания полетного контроллера в режиме Offboard.
SITL	Software-In-The-Loop	Метод программно-аппаратного моделирования («программа в контуре»), имитирующий физику полета и работу

ВКР УлГТУ

		датчиков для верификации алгоритмов без реального борта.
STM32	—	Семейство микроконтроллеров, на базе вычислительной архитектуры которых построена аппаратная часть низкоуровневого полетного контроллера.
V_{stall}	—	Минимальная эволютивная скорость полета (скорость сваливания) беспилотного летательного аппарата самолетного типа.
Warm start	—	Метод «теплого старта» решателя; инициализация начального приближения оптимальным решением с предыдущего шага для ускорения сходимости IPOPT.

ВКР УДГУ

ВВЕДЕНИЕ

Посадка беспилотного летательного аппарата с фиксированным крылом на подвижную наземную или надводную платформу является наиболее критическим этапом автономного полета. В отличие от систем мультироторного типа, аппараты самолетного типа обладают высокой минимальной скоростью полета V_{stall} и принципиально неспособны осуществлять зависание над точкой приземления. Данное свойство исключает возможность применения реактивных алгоритмов управления и требует проактивного расчета траектории сближения. Дополнительная сложность обуславливается необходимостью выполнения посадки в условиях динамического маневрирования целевой платформы и стохастических ветровых возмущений.

Традиционные радионавигационные и спутниковые системы (GNSS/GPS) не обеспечивают требуемую сантиметровую точность взаимного позиционирования, а также уязвимы к потере сигнала или преднамеренному подавлению в условиях сложной помеховой обстановки. В связи с этим возникает необходимость разработки автономных систем локализации на основе бортовых оптических сенсоров монокулярного типа. Однако использование алгоритмов машинного зрения в контуре управления накладывает ограничения на пространственную ориентацию планера. Резкие маневры вызывают выход контрастных маркеров из поля зрения объектива, что приводит к необратимому разрыву обратной связи.

Классические методы автоматического регулирования, такие как пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы, фундаментально реактивны и начинают действовать только после возникновения ошибки позиционирования. Они не способны превентивно учитывать кинематику цели и ограничения, накладываемые на актуаторы и углы ориентации БПЛА. Решением данной проблемы является применение двухуровневой архитектуры управления. На нижнем уровне стабилизация углов крена ϕ, тангажа θ и воздушной скорости V_a осуществляется

ВКР УлГУ

быстрыми классическими контурами автопилота. На верхнем уровне синтезируется модельно-предиктивный регулятор (Model Predictive Control, MPC), который в реальном времени решает оптимизационную задачу на скользящем горизонте планирования. Это позволяет прогнозировать движение платформы, оптимизировать глиссаду сближения и превентивно минимизировать приращения команд управления для гарантированного удержания маркеров в FOV камеры.

Интеграция подсистемы навигации и MPC-регулятора требует построения высокоточного фильтра комплексирования данных. Бортовые измерения относительных координат, получаемые на основе решения геометрической задачи Perspective-n-Point (PnP) по конфигурации инфракрасных (ИК) маркеров платформы, поступают на вход Расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filter, EKF). EKF обеспечивает непрерывную фильтрацию шумов измерений, оценку вектора линейных скоростей цели и экстраполяцию координат при кратковременной потере визуального контакта. Для практического внедрения разработанного математического аппарата критически важна модульная программная архитектура, обеспечивающая бесшовный переход от программно-модельного тестирования (SITL) к выполнению Offboard-команд на реальном бортовом вычислителе через асинхронные интерфейсы.

Целью работы является разработка и программная реализация комплексной системы оптической навигации и предиктивного управления для полностью автономной посадки беспилотного летательного аппарата самолетного типа на движущуюся наземную платформу.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Рассмотреть современные методы машинного зрения и алгоритмы управления, применяемых для автоматической посадки БПЛА.
2) Адаптировать нелинейную математическую модель пространственного движения БПЛА с шестью степенями свободы и

ВКР УлГУ

кинематической модели посадочной платформы для построения среды верификации алгоритмов.

3) Разработать двухуровневую систему автоматического регулирования, включающую низкоуровневый ПД/ПИ-автопилот стабилизации угловой ориентации и высокоуровневый модельно-предиктивный регулятор расчета оптимальной траектории наведения.
4) Разработать подсистему монокулярной оптической навигации на базе алгоритма Perspective-n-Point с интеграцией Расширенного фильтра Калмана для оптимального оценивания вектора состояния и взаимного положения объектов в условиях зашумленных измерений.
5) Разработать модульный программный комплекс на языке Python, включающий среду математического моделирования и модуль асинхронного взаимодействия с полетным контроллером по протоколу MAVLink с использованием библиотеки MAVSDK.

Провести серию вычислительных SITL-экспериментов для оценки работоспособности системы.

Объектом исследования является процесс посадки БПЛА с фиксированным крылом на подвижную наземную посадочную платформу.

Предметом исследования являются алгоритмы предиктивного управления движением БПЛА в процессе сближения, способы координации его траектории с движением платформы, а также методы оптической локализации по ИК-маркерам.

ВКР УлГУ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ АВТОНОМНОЙ ПОСАДКИ БПЛА

1.1 Особенности выполнения посадки БПЛА самолетного типа на подвижные платформы

Анализ кинематики посадки выявляет фундаментальные отличия аппаратов с фиксированным крылом от робототехнических комплексов мультироторного типа. Процесс сближения с наземным объектом характеризуется непрерывной динамикой изменения пространственных координат, которая дополнительно усложняется «жестким»и аэродинамическими рамками. В частности, для экспериментальных платформ с типичным размахом крыла от 1 до 2 метров и взлетной массой порядка 11 кг, физика полета полностью исключает возможность кинематического зависания над точкой приземления. Поддержание необходимой подъемной силы диктует строгое соблюдение минимальной эволютивной скорости сваливания (V_{stall}), равной 12 м/с. При этом конструктивные особенности планера лимитируют максимальную располагаемую скорость значением 25 м/с. Возникающий узкий коридор экстремально ограничивает энергетический потенциал для маневрирования на предпосадочной глиссаде. Как показано в фундаментальных работах по динамике малых БПЛА [6], успешное завершение терминальной фазы требует проактивного согласования векторов скоростей летательного аппарата и подвижной цели с одновременным непрерывным парированием стохастических ветровых возмущений [1].

Отказ от использования спутниковых систем (GNSS) делает бортовой монокулярный оптический сенсор безальтернативным источником навигационной информации на финальном отрезке траектории. Вычисление относительной пространственной 6-DOF позы базируется на алгоритмическом

ВКРУДГУ

анализе конфигурации инфракрасных излучателей, аппаратно интегрированных в посадочную платформу [11]. Вместе с тем, применение оптической обратной связи вводит критические граничные условия на пространственную ориентацию аппарата. Резкие изменения углов Эйлера (крена и тангажа) при отработке маневров неизбежно провоцируют выход маркерной группы за пределы поля зрения (FOV) объектива, что приводит к фатальному разрыву навигационного контура. Для предотвращения срыва визуального трекинга математический аппарат траекторного планирования модифицируется путем внедрения «жестких» градиентных лимитов [9]. На этапе генерации управляющих директив устанавливаются строгие пороги: приращение курсового угла ограничивается 10 градусами за один вычислительный такт, высоты — 2 метрами, а производная воздушной скорости не должна превышать 2 м/с.

Разрешение структурного конфликта между высокочастотной аэродинамикой планера и низкочастотной кинематикой относительного наведения обеспечивается синтезом каскадной двухуровневой архитектуры управления [2, 13]. Нижний уровень абстракции полностью отвечает за стабилизацию углового положения и отработку заданных скоростей. Применение классических ПИД- и ПД-регуляторов, функционирующих на аппаратной частоте 100 Гц, гарантирует требуемую реактивность контуров автопилота [3, 5]. Поскольку реактивные законы регулирования фундаментально не способны экстраполировать будущие изменения траектории маневрирующего объекта, логика относительного позиционирования выносится на верхний вычислительный уровень. Внедрение алгоритма модельно-предиктивного управления (MPC) позволяет в режиме жесткого реального времени решать задачу нелинейной оптимизации на скользящем горизонте [8, 14]. Данный подход генерирует оптимальные упреждающие уставки по путевому углу, высоте и тяге, строго соблюдая как прогнозируемую динамику сближения, так и физические ограничения бортового датчика зрения.

ВКР УлГУ

1.2 Методы оптической навигации и машинного зрения в условиях отсутствия GNSS

Обеспечение автономности терминальной фазы полета в условиях деградации или преднамеренного подавления сигналов глобальных навигационных спутниковых систем требует применения альтернативных методов локализации. Как показывает анализ существующих подходов к машинному зрению [1, 11], классические алгоритмы цветовой сегментации в видимом оптическом диапазоне обладают критической уязвимостью к градиентам естественного освещения. В то же время интеграция современных глубоких нейросетевых детекторов сопряжена с внесением недопустимых транспортных задержек в вычислительный тракт. Инференс тяжеловесных архитектур машинного обучения фундаментально несовместим с требованиями жесткого реального времени, где частота обновления физической модели планера и контуров низкоуровневого автопилота достигает 100 Гц [13].

Для преодоления указанных вычислительных барьеров в рамках разрабатываемого комплекса была синтезирована легковесная навигационная архитектура, опирающаяся на монокулярный сенсор и детерминированную конфигурацию активных инфракрасных маркеров. Оценка относительной пространственной позы осуществляется посредством решения обратной геометрической задачи Perspective-n-Point (PnP). В качестве вычислительного ядра применен итеративный решатель IPPE (Iterative Pose and Proportion Estimation), математический аппарат которого детально обоснован в работах T. Collins и A. Bartoli [9]. Обязательным условием конвергенции данного алгоритма и достоверного расчета векторов трансляции и ротации выступает непрерывный захват объективом не менее четырех копланарных целевых точек.

Аналитическое описание процесса формирования изображения базируется на классической пинхол-модели [11]. Формирование матрицы интринсивных параметров осуществляется на основе заданных фокусных расстояний и координат смещения оптического центра. Для нивелирования оптических

ВКР УлГУ

искажений линзы в математическую модель проекции интегрирован фиксированный вектор коэффициентов радиально-тангенциальной дисторсии, включающий параметры k_1 и k_2. Согласно спецификациям библиотеки OpenCV [7, 16], компенсация дисторсии непосредственно на этапе вычисления проекции позволяет полностью исключить ресурсоемкие операции по предварительной покадровой ректификации видеопотока, тем самым минимизируя алгоритмическую задержку.

Фундаментальной проблемой использования алгоритмов семейства PnP является дискретность получаемых данных: единичный кадр не содержит информации о производных вектора перемещения, а сырые пиксельные координаты центроидов подвержены существенному аппаратному гауссовскому шуму. Для извлечения кинематических параметров и комплексирования оптических измерений в навигационный тракт внедрен Расширенный фильтр Калмана (EKF) [10, 12].

- Кинематическая модель: Фильтрация базируется на гипотезе постоянной скорости, что позволяет непрерывно оценивать расширенный шестимерный вектор состояния.
- Состав вектора: Вектор инкапсулирует как относительные пространственные координаты, так и вектор линейных скоростей целевой платформы.

Данный подход гарантирует сглаживание высокочастотных помех и обеспечивает бесшовную трансляцию достоверных кинематических данных в высокоуровневый предиктивный контур даже в периоды кратковременного выхода маркеров за границы кадра [2].

1.3 Алгоритмы фильтрации и комплексирования навигационных данных

Специфика применения алгоритмов решения обратной перспективы заключается в их фундаментальной пространственно-временной дискретности: изолированный оптический кадр принципиально не способен предоставить

ВКР УлГУ

достоверную метрическую информацию о кинематических производных целевого объекта. Ситуация усугубляется аппаратными погрешностями матрицы монокулярной камеры, которые вызывают высокочастотное «дрожание» пиксельных координат инфракрасных центроидов, генерируя интенсивный гауссовский шум. Для глубокого комплексирования сырых визуальных измерений и извлечения полного вектора относительного движения в вычислительный контур интегрирован Расширенный фильтр Калмана. Как доказывается в фундаментальных трудах по стохастической фильтрации [12], внедрение данного алгоритма позволяет не только эффективно демпфировать высокочастотные помехи, но и гарантировать непрерывную экстраполяцию параметров системы даже в моменты кратковременного срыва визуального трекинга или при возникновении системных транспортных задержек.

В качестве базовой гипотезы математического аппарата фильтрации выбрана кинематическая модель постоянной скорости, что, согласно рекомендациям [10], является оптимальным решением для объектов с предсказуемой траекторией маневрирования. Формируемый шестимерный вектор состояния инкапсулирует как трехмерные относительные координаты, так и соответствующие им компоненты линейных скоростей мобильной базы: $[x, y, z, v_x, v_y, v_z]^T$. Эволюция системы во времени детерминируется матрицей перехода F, осуществляющей кусочно-линейное интегрирование скоростных компонент на дискретном временном шаге dt, жестко привязанном к частоте работы полетного симулятора. Поскольку выходным продуктом PnP-решателя выступает исключительно пространственный вектор трансляции, в структуру фильтра введена матрица наблюдения H. Ее функциональное назначение сводится к математическому проецированию полного шестимерного пространства состояний на трехмерную плоскость позиционных измерений, обеспечивая тем самым корректное усечение ненаблюдаемых кинематических производных.

Калибровка стохастической динамики и скорости сходимости EKF осуществляется посредством тонкой настройки диагональных матриц

ВКР УлГУ

ковариации. Матрица шума процесса Q выступает мерой доверия к выбранной кинематической гипотезе, параметризуя стохастические рывки и немоделируемые ускорения посадочной платформы. Параллельно с этим, матрица шума измерений R аккумулирует в себе количественные оценки аппаратных несовершенств объектива и погрешности алгоритмической экстракции пикселей. Результирующий сглаженный кинематический вектор ($[pn_{est}, pe_{est}, pd_{est}, vn_{est}, ve_{est}, vd_{est}]^T$) маршрутизируется непосредственно в вычислительное ядро верхнего уровня [8]. Передача очищенных и экстраполированных параметров в решатель MPC имеет критическое значение для устойчивости всего комплекса: попытка формирования упреждающей посадочной глиссады на базе зашумленных данных неизбежно спровоцировала бы резонансную раскачку каскадных ПИД-регуляторов нижнего уровня, что, в соответствии с теорией автоматического управления [5], является недопустимым режимом для аппаратов с высокой аэродинамической чувствительностью.

1.4 Системы автоматического управления траекторией сближения

Разработка эффективных законов управления для автономного приземления диктует необходимость строгой декомпозиции динамических процессов. Синтезируемая архитектура обязана раздельно компенсировать высокочастотные колебания аэродинамики планера и низкочастотные кинематические тренды взаимного наведения. Удержание заданных углов пространственной ориентации, а также базовая стабилизация воздушной скорости делегируются классическому низкоуровневому автопилоту. Частота квантования данного вычислительного контура жестко зафиксирована на отметке 100 Гц, что обеспечивает необходимую реактивность исполнительных механизмов.

ВКР УлГУ

1.4.1 Классические контуры управления и их алгоритмические ограничения

Фундамент стабилизации базируется на каскадной парадигме управления. В частности, боковой канал автопилота трансформирует курсовое рассогласование в целевой угол крена, отработка которого возложена на пропорционально-дифференцирующий (ПД) регулятор, управляющий сервоприводами элеронов. Параллельно с этим продольный контур генерирует уставки тангажа, вычисляемые на основе текущей высотной ошибки, для последующего отклонения руля высоты. Критически важным аспектом реализации выступает защита от интегрального насыщения (windup). Применение алгоритма anti-windup clamping позволяет принудительно замораживать накопление ошибки в ПИ-регуляторах в те моменты, когда актуаторы достигают своих физических пределов (например, при агрессивном парировании постоянного бокового ветра).

Тем не менее, эксплуатация исключительно классических ПИД-регуляторов сопряжена с их фундаментальным концептуальным изъяном — абсолютной реактивностью. Вычисление корректирующего воздействия инициируется исключительно постфактум, то есть после фиксации фактической ошибки позиционирования. Подобная линейная логика принципиально исключает возможность упреждающего учета вектора скорости маневрирующей посадочной платформы. Более того, реактивные законы математически не способны напрямую обрабатывать «жесткие» нелинейные ограничения системы. К таким лимитам относятся как критическое требование по удержанию инфракрасных маркеров в пределах FOV объектива, так и недопущение падения скорости планера ниже минимального эволютивного порога.

1.4.2 Интеграция модельно-предиктивного управления для генерации оптимальной глиссады

Нивелирование описанных недостатков реактивных контуров достигается за счет внедрения в верхний уровень иерархии управления модельно-

ВКР УлГУ

предиктивного контроллера (MPC). Решение задачи квадратичной оптимизации на скользящем горизонте позволяет регулятору непрерывно синтезировать оптимальную виртуальную глиссаду сближения. Глубина прогнозирования N установлена равной 20 шагам; при интервале дискретизации $dt = 0.1$ с это формирует временное окно упреждения длительностью ровно 2 секунды. В качестве предикторного ядра выступает математическая модель кинематики материальной точки, модифицированная для учета инерционности подлежащего каскадного автопилота. Динамика отработки команд аппроксимируется с помощью постоянных времени: $\tau_\chi = 0.5$ с для курсового угла и $\tau_h = 1.0$ с для высоты.

Выходом алгоритма является вектор упреждающих команд $[\chi_c, h_c, V_{ac}]^T$. Поиск оптимального вектора базируется на минимизации целевого функционала стоимости, который параметризуется диагональными весовыми матрицами Q (штраф за ошибку состояния) и R (штраф за энергозатраты и градиент управления). Главным достоинством синтезированного предиктивного подхода является способность к детерминированному контролю «жестких» эксплуатационных рамок. Так, в структуру решателя напрямую имплементированы граничные условия воздушной скорости: аппарат обязан находиться в строгом коридоре от 12 до 25 м/с.

Во избежание фатального срыва оптического трекинга математический аппарат регулятора дополнен «жестким» и лимитами на максимальные приращения команд за один вычислительный такт. Изменение курсовой уставки искусственно ограничено 10 градусами, высоты — 2 метрами, а приращение целевой скорости купируется на уровне 2 м/с. Подобное жесткое лимитирование превентивно отсекает генерацию команд, вызывающих резкие крены и тангажи, тем самым гарантируя постоянное удержание инфраструктурных ИК-маркеров в пределах активной матрицы сенсора.

Программная реализация нелинейного программирования выполнена на базе высокопроизводительного фреймворка CasADi. Для обеспечения аппаратной отказоустойчивости наведения разработан специализированный

ВКР УлГУ

механизм программного резервирования. В случае возникновения вычислительных сингулярностей и расходимости interior-point решателя IPOPT, алгоритм блокирует сбойный такт оптимизации и ретранслирует последнюю успешно вычисленную матрицу управления. Этот подход надежно предотвращает потерю пространственной устойчивости БПЛА на критической терминальной стадии снижения.

1.5 Обоснование выбранной архитектуры и постановка задачи исследования

Выбор в пользу двухуровневой децентрализованной структуры продиктован физической невозможностью разрешения «жестких» аэродинамических ограничений 11-килограммового планера и строгих геометрических лимитов монокулярной камеры в рамках традиционных одноконтурных систем автоматического управления. Автономное функционирование подсистемы оптической навигации выражается в том, что оперативный расчет относительного пространственного положения реализуется итеративным PnP-решателем IPPE [7, 9] исключительно на основе детекции паттерна активных инфракрасных маркеров. Интеграция Расширенного фильтра Калмана, базирующегося на кинетической гипотезе постоянной скорости, призвана компенсировать неустранимый дефицит измеряемых производных и подавить высокочастотный джиттер видеопотока [10, 12]. В то время как низкоуровневый автопилот берет на себя задачу высокочастотной стабилизации угловых скоростей и ориентации планера на частоте 100 Гц [3, 5], контур верхнего уровня, представленный алгоритмом модельно-предиктивного управления (MPC) [8], осуществляет непрерывный синтез упреждающих команд курса, высоты и воздушной скорости $[\chi_c, h_c, V_{ac}]^T$. Дискретный горизонт прогнозирования в 20 шагов, заложенный в символьный оптимизатор CasADi [4], позволяет детерминировано учитывать ограничения FOV (в пределах 10° по

ВКР УлГУ

курсу и 2 м по высоте за вычислительный такт), превентивно блокируя потерю маркерной группы из кадра при динамичном маневрировании.

Особое внимание в архитектуре комплекса уделено обеспечению программной отказоустойчивости в условиях вычислительных сингулярностей нелинейных моделей. Возможная расходимость нелинейного градиентного решателя IPOPT [14] нивелируется алгоритмическим шлюзом резервирования (fallback), который дублирует последнюю валидную матрицу управления, сохраняя тем самым пространственную устойчивость БПЛА при локальных сбоях оптимизатора. Программное ядро развернуто на языке Python с привлечением механизмов асинхронного параллелизма библиотеки asyncio, что гарантирует неблокирующее сопряжение навигационных потоков с аппаратной частью. Информационный обмен с полетным контроллером организован посредством протокола MAVLink через высокоуровневые интерфейсы библиотеки MAVSDK [15]. Это позволило полностью исключить из структуры дорогостоящие и уязвимые для радиоэлектронных помех датчики, такие как лазерные дальномеры и навигационные модули RTK GPS. Подобный минималистичный подход обеспечивает инвариантность разработанного софта к вычислительной среде: программный стек без структурных изменений переносится из среды полунатурного SITL-моделирования (Software-in-the-Loop) непосредственно на бортовой микрокомпьютер.

Обобщение результатов проведенного критического анализа позволило строго детерминировать генеральную цель настоящего исследования, которая заключается в разработке, алгоритмическом обосновании и программной реализации комплексной системы оптической локализации и предиктивно-траекторного управления, обеспечивающей безаварийную посадку БПЛА самолетного типа на мобильную наземную платформу в условиях отсутствия GNSS. Реализация поставленной научно-технической цели потребовала декомпозиции исследования на следующие ключевые подзадачи:

ВКР УлГУ

1. Синтез и программная аппроксимация нелинейной математической модели пространственного движения (6-DOF) планера в возмущенной атмосфере [6, 13].
2. Проектирование каскадных контуров стабилизации автопилота с обязательным внедрением механизмов демпфирования интегрального насыщения (anti-windup clamping) [3, 5].
3. Разработка подсистемы PnP-оценщика, агрегированного с Расширенным фильтром Калмана для комплексной фильтрации и экстраполяции навигационного вектора состояния [10, 11].
4. Алгоритмическая имплементация высокоуровневого MPC-контроллера на базе CasADi/IPOPT для упреждающего планирования оптимальной траектории снижения [4, 8, 14].

Финальным критерием верификации синтезированного комплекса выступает цикл численных симуляций, призванных экспериментально подтвердить асимптотическое сведение относительной пространственной дистанции к нулю при сохранении устойчивости планера в границах разрешенного скоростного диапазона от 12 до 25 м/с.

ВКР УлГУ

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ

2.1 Системы координат и базовые кинематические преобразования

Математическое описание 6-DOF кинематики взаимного сближения требует формирования многоуровневого топологического пространства, состоящего из четырех взаимосвязанных координатных базисов [13]. В качестве абсолютного инерциального базиса (ИСО) выбрана нормальная земная топоцентрическая система, построенная по авиационному стандарту NED (North-East-Down). Проекция радиус-векторов аппарата и маневрирующей платформы на оси северного (N), восточного (E) и вертикального (D) направлений позволяет однозначно детерминировать их абсолютное пространственное положение в любой момент времени сближения.

Анализ углового движения 11-килограммового планера осуществляется в связанной системе координат (ССО), начало которой строго отцентрировано относительно центра масс БПЛА. Ориентация осей ССО традиционна для летательных аппаратов самолетного типа: продольная ось коллинеарна строительной горизонтали фюзеляжа, поперечная направлена вдоль правого полукрыла, а нормальная ось дополняет систему до правой. Трансляция кинематических параметров из связанного базиса в инерциальный реализуется посредством применения матрицы направляющих косинусов R_{b2i}. Как отмечается в классических трудах по динамике полета [6], формирование данного ортогонального оператора базируется на последовательности вращений Эйлера-Крылова (рыскание ψ, тангаж θ, крен ϕ). В соответствии с принятой конвенцией «3-2-1», аппарат последовательно поворачивается вокруг оси Z (D) на угол ψ, затем вокруг новой оси Y на угол θ, и окончательно вокруг продольной оси X на угол ϕ .

ВКР УлГУ

Аналитическое выражение результирующего оператора пространственного вращения R_{b2i} принимает следующий вид:

$$R_{b}^{i} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}$$

Интеграция подсистемы машинного зрения обуславливает введение собственной системы координат камеры (СКК). Экстринсивные параметры сенсора, описывающие его жесткую геометрическую привязку к центру масс БПЛА, параметризуются инвариантной матрицей вращения R_{bc} и вектором межосевого смещения t_{bc}, которые количественно отражают углы установки и вынос оптического центра объектива. На противоположной стороне навигационного контура вводится система координат посадочной платформы (СКП). Ее метрический ноль (начало координат) локализован в геометрическом центре инфраструктурного паттерна, образованного пятью инфракрасными излучателями. При этом вектор курса χ_{plat} детерминирует азимутальную ориентацию продольной оси платформы относительно северного направления (оси N) в плоскости горизонта.

Фундаментальной основой алгоритмов относительного позиционирования выступает сквозное преобразование векторов перемещения [11]. Вычисление истинного вектора трансляции платформы в оптическом базисе СКК требует выполнения каскада проекций. Изначально абсолютная разность координат объектов в ИСО проецируется на связанный базис ССО путем умножения на транспонированную (обратную, в силу ортогональности) матрицу вращения аппарата. На следующем этапе полученный вектор пересчитывается в систему камеры с учетом экстринсивных параметров R_{bc} и t_{bc}. Синтезированная таким образом цепочка кинематических трансформаций формирует входные данные для прямой проекционной модели. Используя интринсивные характеристики сенсора (фокусные расстояния f_x, f_y и координаты главной точки c_x, c_y), алгоритм семейства PnP (Perspective-n-Point) [7, 9]

ВКР УлГУ

математически увязывает трехмерные координаты ИК-маркеров с их двумерными пиксельными откликами на активной матрице бортового детектора.

2.2 Нелинейная кинематическая и динамическая модель БПЛА.

Математическая формализация пространственного движения беспилотного аппарата опирается на классическую теорию нелинейной динамики твердого тела с шестью степенями свободы [6, 13]. Для исчерпывающего аналитического описания системы в фазовом пространстве сформирован расширенный вектор состояния x, включающий в себя 12 независимых фазовых координат:

$\mathbf{x} = [p_n, p_e, p_d, u, v, w, \phi, \theta, \psi, p, q, r]^T$

В данной структуре компоненты u, v, w характеризуют проекции вектора путевой скорости на оси связанной системы координат (ССО), тогда как p, q, r описывают соответствующие проекции вектора угловой скорости. Комплексная математическая модель планера алгоритмически декомпозирована на взаимодействующие блоки кинематики и динамики.

2.2.1. Уравнения трансляционного движения

Трансляционная кинематика детерминирует дифференциальную связь между производными абсолютных координат в инерциальном базисе и вектором линейных скоростей в связанной системе. Трансформация осуществляется посредством оператора направляющих косинусов, где для компактности записи тригонометрические функции косинуса и синуса традиционно обозначаются как c и s.

\begin{bmatrix} \dot{p}_n \\ \dot{p}_e \\ \dot{p}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{\theta}c_{\psi} & s_{\phi}s_{\theta}c_{\psi} - c_{\phi}s_{\psi} & c_{\phi}s_{\theta}c_{\psi} + s_{\phi}s_{\psi} \\ c_{\theta}s_{\psi} & s_{\phi}s_{\theta}s_{\psi} + c_{\phi}c_{\psi} & c_{\phi}s_{\theta}s_{\psi} -

ВКР УлГУ

s_{\phi}c_{\psi} \\ -s_{\theta} & s_{\phi}c_{\theta} & c_{\phi}c_{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}

Синтез уравнений динамики поступательного движения базируется на применении второго закона Ньютона к неинерциальной (вращающейся) системе координат [13]. Следствием такого перехода является возникновение в математической модели дополнительных фиктивных сил — кориолисовых ускорений.

\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} rv - qw \\ pw - ru \\ qu - pv \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}

Векторная форма дифференциального уравнения увязывает массу планера m с компонентами результирующего силового вектора (F_x, F_y, F_z), который аккумулирует в себе проекции гравитационного воздействия, аэродинамических сил и тяги маршевого двигателя на оси ССО.

2.2.2. Уравнения вращательного движения

Кинематические соотношения углового движения строго регламентируют нелинейную зависимость между скоростями изменения углов Эйлера-Крылова и компонентами вектора угловой скорости, измеренными бортовыми гироскопами.

\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}

Эволюция вращательного движения аппарата во времени описывается классической системой динамических уравнений Эйлера. Опираясь на допущение о конструктивной симметрии планера относительно продольной плоскости (что физически обнуляет центробежные моменты инерции $I_{xy} = I_{yz} = 0$), тензор инерции существенно упрощается.

ВКР УлГУ

\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 pq - \Gamma_2 qr \\ \Gamma_5 pr - \Gamma_6 (p^2 - r^2) \\ \Gamma_7 pq - \Gamma_1 qr \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Gamma_3 l + \Gamma_4 n \\ \frac{1}{I_y} m_m \\ \Gamma_4 l + \Gamma_8 n \end{bmatrix}

Следуя методике параметризации, предложенной в фундаментальном труде Р. Бирда и Т. Маклейна [6], дифференциальные уравнения разрешаются относительно производных угловой скорости с введением нормирующих констант $\Gamma_1 \ldots \Gamma_8$. Данные коэффициенты жестко заданы геометрическими моментами инерции аппарата (I_x, I_y, I_z, I_{xz}), а внешнее возмущение представлено проекциями результирующего аэродинамического момента: крена (l), тангажа (m_m) и рыскания (n).

2.2.3. Внешние силы и моменты

Для замыкания динамической модели необходимо определить суммарные силы и моменты, действующие на планер. Они являются функциями от воздушной скорости V_a, углов атаки α и скольжения β, а также от отклонений управляющих поверхностей: элеронов δ_a, руля высоты δ_e, руля направления δ_r и газа двигателя δ_t.

Аналитическое замыкание сформированной системы дифференциальных уравнений требует детерминированного вычисления суммарного вектора силового и моментного воздействия на планер. В общем случае данные векторы представляют собой сложные многомерные функции, аргументами которых выступают текущая воздушная скорость V_a, углы атаки α и скольжения β, а также степени отклонения исполнительных механизмов: элеронов δ_a, руля высоты δ_e, руля направления δ_r и дроссельной заслонки δ_t [2].

\mathbf{f}_{grav} = \begin{bmatrix} -mg \sin\theta \\ mg \cos\theta \sin\phi \\ mg \cos\theta \cos\phi \end{bmatrix}

Математическая проекция вектора гравитации из абсолютной системы координат на связанные оси осуществляется через тригонометрические преобразования углов пространственной ориентации. Формирование

ВКР УлГУ

аэродинамического облика аппарата в продольном и боковом каналах базируется на использовании безразмерных аэродинамических коэффициентов (таких как C_L, C_D, C_m) [13]. Согласно законам аэродинамики, величины результирующих сил и моментов прямо пропорциональны динамичному скоростному напору $\underline{q} = \frac{1}{2}\rho V_a^2$ и масштабируются характерными геометрическими параметрами крыла: несущей площадью S, размахом b и средней аэродинамической хордой c. Синтезированная таким образом 6-DOF модель обладает исчерпывающей полнотой для адекватного имитационного моделирования всех режимов автономного полета.

2.3 Математическая модель движения посадочной платформы.

Синтез устойчивых алгоритмов терминального наведения принципиально невозможен без формализованного математического описания кинематики подвижной посадочной станции. В рамках рассматриваемой задачи постулируется базовая кинематическая гипотеза: наземное транспортное средство совершает равномерное прямолинейное движение в плоскости местного горизонта. При этом эксплуатационная скорость мобильного модуля соизмерима с крейсерскими режимами полета БПЛА. Подобное энергетическое подобие делает физически реализуемым сценарий захода на посадку «вдогон» (tail-chase landing), при котором происходит асимптотическое уравнивание векторов скоростей обоих объектов [1, 2].

2.3.1. Кинематика движения платформы

Топологическая привязка объектов осуществляется путем введения локальной связанной системы координат посадочной палубы F_p, метрический ноль которой (точка O_p) алгоритмически совмещен с геометрическим барицентром паттерна инфракрасных излучателей [11]. В проекции на инерциальный базис F_i (введенный ранее в п. 2.1), эволюция

ВКР УлГУ

пространственного положения равномерно движущейся цели описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\dot{p}_{n,plat} = V_{plat} \cos\chi_{plat}$$

$$\dot{p}_{e,plat} = V_{plat} \sin\chi_{plat}$$

$$\dot{h}_{plat} = 0$$

где:

- $p_{n,plat}$ и $p_{e,plat}$ — текущие координаты метрического центра платформы в горизонтальной плоскости (северное и восточное смещения соответственно);
- h_{plat} — высота платформы над уровнем земли (в рамках модели принимается константой);
- V_{plat} — постоянная линейная скорость движения транспортного средства;
- χ_{plat} — постоянный путевой угол платформы относительно направления на север.

2.3.2. Вектор состояния и интеграция с контуром управления

Вектор состояния платформы в непрерывном времени можно представить как:

$$\mathbf{x}_{plat}(t) = [p_{n,plat}(t), p_{e,plat}(t), h_{plat}, V_{plat}, \chi_{plat}]^T$$

Практическая ценность синтезированной модели раскрывается на этапе ее интеграции с контуром управления верхнего уровня. Специфика алгоритмов машинного зрения, в частности PnP-решателей [9], заключается в их низкой частоте дискретизации, лимитированной кадровой частотой бортового сенсора. Кроме того, оптический тракт фундаментально подвержен стохастическим сбоям при агрессивной внешней засветке или динамическом выходе целевой группы за пределы поля зрения объектива (FOV). Для купирования данных деструктивных эффектов вектор состояния x_{plat} подвергается непрерывной стохастической фильтрации. Применение Расширенного фильтра Калмана (EKF) [10, 12] позволяет эффективно экстраполировать параметры движения цели даже в периоды полного отсутствия визуального контакта.

ВКР УлГУ

Сглаженные и экстраполированные компоненты пространственного положения и вектора скорости ретранслируются непосредственно в вычислительное ядро модельно-предиктивного регулятора (MPC) [8]. Опираясь на заложенные уравнения прямолинейного движения, оптимизатор проецирует траекторию мобильной платформы на всю глубину горизонта прогнозирования N_p. Подобный подход обеспечивает формирование адаптивной пространственной глиссады и проактивную генерацию управляющих директив для каскадов низкоуровневого автопилота. Конечной целью данного вычислительного процесса выступает плавное кинематическое сближение, гарантирующее безударное сведение вектора относительной скорости объектов (V_{rel}) к нулю строго в момент физического контакта шасси с палубой [13].

2.4 Архитектура низкоуровневого управления.

Математический синтез контуров автоматического регулирования диктует необходимость строгой декомпозиции системной динамики. Разрешение структурного конфликта между высокочастотными аэродинамическими процессами планера и низкочастотной кинематикой терминального наведения достигается за счет внедрения двухуровневой иерархической архитектуры [13]. Фундаментальная стабилизация пространственной ориентации (углов крена ϕ и тангажа θ) в связке с поддержанием заданной воздушной скорости V_a делегирована низкоуровневому аппаратному автопилоту. Использование классических пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) и пропорционально-дифференцирующих (ПД) законов управления на частоте квантования 100 Гц обеспечивает требуемую реактивность при отработке угловых скоростей, снимаемых непосредственно с бортовых микроэлектромеханических гироскопов [6].

В соответствии с парадигмой каскадного управления [3], архитектура программного комплекса сегментирована на независимые тракты, каждый из которых изолированно компенсирует специфические моды 6-DOF движения БПЛА.

ВКР УлГУ

Боковой канал

Пространственное маневрирование в азимутальной плоскости реализуется через боковой канал, где курсовое рассогласование каскадно трансформируется в физическое отклонение аэродинамических поверхностей.

- Внешний контур курса функционирует на базе пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Он преобразует ошибку по путевому углу $e_\chi = \chi_c - \chi$ в целевую кинематическую уставку крена φ_c:

$$\phi_c = \text{clamp}\left(k_{p,\chi} e_\chi + k_{i,\chi} \int e_\chi dt, -\phi_{\max}, \phi_{\max}\right)$$

- где $e_\chi = \chi_c - \chi$ — ошибка по путевому углу.
- Внутренний контур крена возлагает отработку сгенерированного угла на ПД-закон, вычисляющий управляющий сигнал для сервоприводов элеронов δ_a. Для исключения алгоритмически дестабилизирующего эффекта «производного удара» [5], дифференциальная компонента формируется не путем численного дифференцирования ошибки позиционирования, а напрямую извлекается из гироскопических измерений угловой скорости кренения p:

$$\delta_a = \text{clamp}\left(k_{p,\phi} (\phi_c - \phi) - k_{d,\phi} p, -\delta_{\max}, \delta_{\max}\right)$$

Продольный канал

Управление в вертикальной плоскости строится по аналогичной вложенной схеме, транслируя позиционное отклонение по высоте в угловое положение руля высоты [13].

- Внешний контур высоты утилизирует ПИ-регулятор для конвертации высотной ошибки $e_h = h_c - h$ в требуемый угол тангажа θ_c:

$$\theta_c = \text{clamp}\left(k_{p,h} e_h + k_{i,h} \int e_h dt, -\theta_{\max}, \theta_{\max}\right)$$

- Внутренний контур тангажа, представленный ПД-регулятором, детерминирует отклонение руля высоты δ_e, строго опираясь на показания угловой скорости тангажирования q:

ВКР УлГУ

$$\delta_e = \text{clamp}\left(k_{p,\theta} (\theta_c - \theta) - k_{d,\theta} q, -\delta_{\max}, \delta_{\max}\right)$$

Канал воздушной скорости

Энергетическое состояние планера контролируется изолированным контуром. Безукоризненная отработка упреждающих команд высокоуровневого предиктивного регулятора и предотвращение падения скорости ниже минимально допустимого эволютивного порога обеспечиваются специализированным ПИ-законом. Выходным сигналом выступает нормированная команда тяги маршевого двигателя δ_t, ограниченная диапазоном от 0 до 1:

$$\delta_t = \text{clamp}\left(k_{p,V} e_V + k_{i,V} \int e_V dt, 0, 1\right)$$

где переменная $e_V = V_{a,c} - V_a$ формализует текущее кинематическое рассогласование по воздушной скорости.

Механизм защиты от интегрального насыщения (Anti-windup clamping)

Фундаментальной уязвимостью классических ПИ-интеграторов является склонность к неконтролируемому накоплению избыточной математической ошибки в режимах, когда актуаторы достигают своих физических или аэродинамических лимитов [5]. В контексте рассматриваемой задачи этот эффект критически проявляется при длительном парировании устойчивого бокового сноса под воздействием ветра.

Для купирования данной проблемы в программный код каскадов интегрирован механизм anti-windup clamping [3]. Суть метода сводится к принудительной алгоритмической заморозке накопления интегральной суммы $\int e(t)dt$ в моменты выхода выходного сигнала регулятора за установленные эксплуатационные пороги ($\phi_{\max}$, $\theta_{\max}$, $\delta_{\max}$). Процесс численного интегрирования возобновляется исключительно в момент изменения знака ошибки управления, либо при возвращении системы в линейную зону регулирования. Подобная нелинейная модификация классических законов гарантирует сохранение фазовой устойчивости БПЛА в условиях интенсивных внешних возмущений.

ВКР УлГУ

2.5 Моделирование подсистемы машинного зрения.

В условиях деградации или преднамеренного подавления радионавигационного поля спутниковых систем, базисом навигационного обеспечения на терминальном этапе сближения становится подсистема монокулярной оптической локализации. Ее фундаментальная роль сводится к непрерывному и автономному вычислению относительной шестимерной позы БПЛА и маневрирующей посадочной палубы. Данная процедура опирается исключительно на алгоритмический анализ детерминированной геометрической конфигурации бортовых инфракрасных излучателей.

Аналитическое описание прямой проекции

Процесс формирования оптического отклика на активной матрице бортового сенсора строго формализуется посредством классической пинхол-модели (pinhole camera model). В рамках данного математического аппарата осуществляется трансформация трехмерных пространственных координат инфраструктурных ИК-маркеров в двумерную плоскость пиксельных координат [11]. Алгебраически проекционный переход из локальной системы координат платформы в базис оптического детектора детерминируется матрицей интринсивных параметров K:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где диагональные элементы f_x и f_y параметризуют фокусные расстояния линзы, а величины c_x и c_y определяют метрическое смещение главной оптической оси объектива.

Аппаратные несовершенства оптической системы нивелируются путем внедрения в проекционную функцию фиксированного вектора коэффициентов радиально-тангенциальной дисторсии (базово учитывающего параметры k_1 и k_2). Как подтверждается спецификациями программных библиотек машинного зрения [7], компенсация искажений непосредственно на этапе вычисления проекции позволяет полностью исключить из вычислительного

ВКР УлГУ

тракта ресурсоемкие операции по предварительной покадровой ректификации видеопотока. Подобная оптимизация имеет критическое значение для поддержания работоспособности навигационного контура в режиме жесткого реального времени без внесения системных транспортных задержек.

Для обеспечения достоверности полунатурного (SITL) моделирования алгоритм прямого проецирования искусственно модифицируется путем аддитивного наложения высокочастотного гауссовского шума. Эта алгоритмическая мера позволяет точно сымитировать стохастическое «дрожание» пиксельных координат центроидов, которое неизбежно возникает на реальных полупроводниковых матрицах под воздействием тепловых и электромагнитных помех.

Оценка пространственного положения

Восстановление относительной топологии сближающихся объектов базируется на решении обратной геометрической задачи Perspective-n-Point (PnP). В роли основного вычислительного ядра задействован высокопроизводительный итеративный решатель IPPE (Iterative Pose and Proportion Estimation) [9]. Математическая сходимость данного алгоритма и, как следствие, достоверный расчет векторов трансляции и матрицы направляющих косинусов жестко обусловлены непрерывным оптическим захватом как минимум четырех копланарных целевых точек. Результирующая матрица вращения однозначно детерминирует пространственную ориентацию системы координат камеры (СКК) относительно связанного базиса посадочной платформы (СКП).

Вместе с тем, прикладное применение алгоритмов семейства PnP сопряжено с фундаментальным кинематическим ограничением: оценка вектора состояния производится на основе изолированного оптического кадра, вследствие чего результирующее решение носит строго дискретный характер [12]. Извлеченная позиционная информация принципиально лишена метрических производных по времени (компонент вектора скорости). По этой причине сырой трансляционный вектор, синтезированный подсистемой

ВКР УлГУ

машинного зрения, алгоритмически непригоден для прямой ретрансляции в предиктивный контур управления. Возникающий информационный разрыв преодолевается посредством маршрутизации оптических измерений в блок Расширенного фильтра Калмана (EKF) [10], где осуществляется их стохастическое сглаживание и дифференциальная экстраполяция недостающих кинематических параметров.

2.6 Комплексирование и фильтрация оптических измерений

Фундаментальной проблемой алгоритмов визуальной одометрии и решателей геометрической задачи PnP выступает пространственно-временная дискретность генерируемых ими данных. Изолированный видеокадр принципиально лишен метрической информации о производных кинематического вектора. Более того, неизбежное тепловое и электромагнитное «дрожание» пиксельных координат инфракрасных центроидов на активной матрице сенсора продуцирует интенсивный высокочастотный гауссовский шум. Для решения критической задачи глубокого комплексирования сырых оптических измерений и обеспечения непрерывности навигационного решения в вычислительный тракт интегрирован Расширенный фильтр Калмана [10]. Внедрение данного стохастического наблюдателя не только эффективно демпфирует влияние аппаратных задержек системы машинного зрения, но и гарантирует аналитическую экстраполяцию координат в моменты кратковременного срыва визуального трекинга.

Модель состояния и этап экстраполяции

Математический аппарат синтезированного фильтра базируется на кинематической гипотезе постоянной скорости. Согласно исследованиям в области оптимального оценивания [12], данная гипотеза представляет собой рациональный компромисс для аппроксимации движения инерционных наземных объектов. Фазовое пространство системы описывается расширенным шестимерным вектором состояния, инкапсулирующим относительные

ВКР УлГУ

пространственные координаты и соответствующие компоненты вектора линейной скорости маневрирующей платформы:

$$\mathbf{x} = [x, y, z, v_x, v_y, v_z]^T$$

Эволюция системы во времени формализуется через матрицу перехода состояний (якобиан) F, осуществляющую кусочно-линейное интегрирование скоростных компонент на дискретном временном шаге dt, жестко детерминированном тактовой частотой полетного симулятора. Аналитически этап априорной экстраполяции описывается следующими матричными разностными уравнениями:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$$

$$P_{k|k-1} = F P_{k-1|k-1} F^T + Q$$

где P представляет собой матрицу ковариации ошибки оценивания, а Q — матрицу ковариации шума процесса.

Модель наблюдения и этап апостериорной коррекции

Ввиду того, что алгоритмический выход PnP-решателя ограничивается исключительно пространственным вектором трансляции, в структуру фильтра введена специализированная матрица наблюдения H. Ее функциональное назначение сводится к математическому проецированию полного шестимерного фазового пространства на трехмерную плоскость позиционных измерений, что обеспечивает корректное отсечение ненаблюдаемых напрямую кинематических производных. Интеграция актуальных оптических измерений $\mathbf{z}$ и последующая апостериорная коррекция вектора состояния реализуются через классическую систему уравнений [10, 12]:

Вычисление вектора невязки :

$$\mathbf{y} = \mathbf{z} - H \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$$

Определение ковариации невязки:

$$S = H P_{k|k-1} H^T + R$$

Расчет оптимального коэффициента (матрицы) усиления Калмана:

$$K = P_{k|k-1} H^T S^{-1}$$

ВКР УлГУ

Апостериорное обновление вектора состояния и ковариационной матрицы:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + K \mathbf{y}$$

$$P_{k|k} = (I - K H) P_{k|k-1}$$

Настройка матриц ковариации и интеграция с контуром управления

Калибровка динамики сходимости и инерционности фильтра осуществляется посредством тонкой настройки диагональных ковариационных матриц. Матрица шума процесса Q выступает количественной мерой неопределенности выбранной кинематической гипотезы, параметризуя стохастические рывки и немоделируемые ускорения мобильной посадочной палубы. В свою очередь, матрица ковариации шума измерений R аккумулирует дисперсии аппаратных погрешностей объектива и алгоритмических неточностей экстракции пиксельных центроидов.

Результирующий сглаженный вектор, содержащий достоверные экстраполированные координаты и линейные скорости цели, напрямую маршрутизируется в вычислительное ядро предиктивного управления. Трансляция очищенного от высокочастотных флуктуаций кинематического профиля позволяет оптимизатору генерировать упреждающую глиссаду на базе истинного тренда движения платформы. Подобная межуровневая архитектурная связка, как отмечается в теории автоматического управления [5], фундаментально исключает риск возникновения резонансной раскачки каскадных ПИД-регуляторов нижнего уровня, которая неизбежно возникает при попытке прямого замыкания контура обратной связи на зашумленные сырые навигационные данные.

График на рисунке 1 демонстрирует работу Расширенного фильтра Калмана в условиях зашумленных оптических измерений. Визуализация наглядно показывает, как алгоритм эффективно подавляет высокочастотный гауссовский шум, неизбежно возникающий при решении обратной геометрической задачи PnP, и обеспечивает непрерывность навигационного решения. Особое внимание на графике уделено областям с серой заливкой,

ВКР УлГУ

имитирующим кратковременную потерю визуального контакта с ИК-маркерами: в эти моменты фильтр осуществляет аналитическую экстраполяцию вектора состояния, что позволяет избежать резких скачков управляющих директив и поддерживает устойчивость контура наведения.

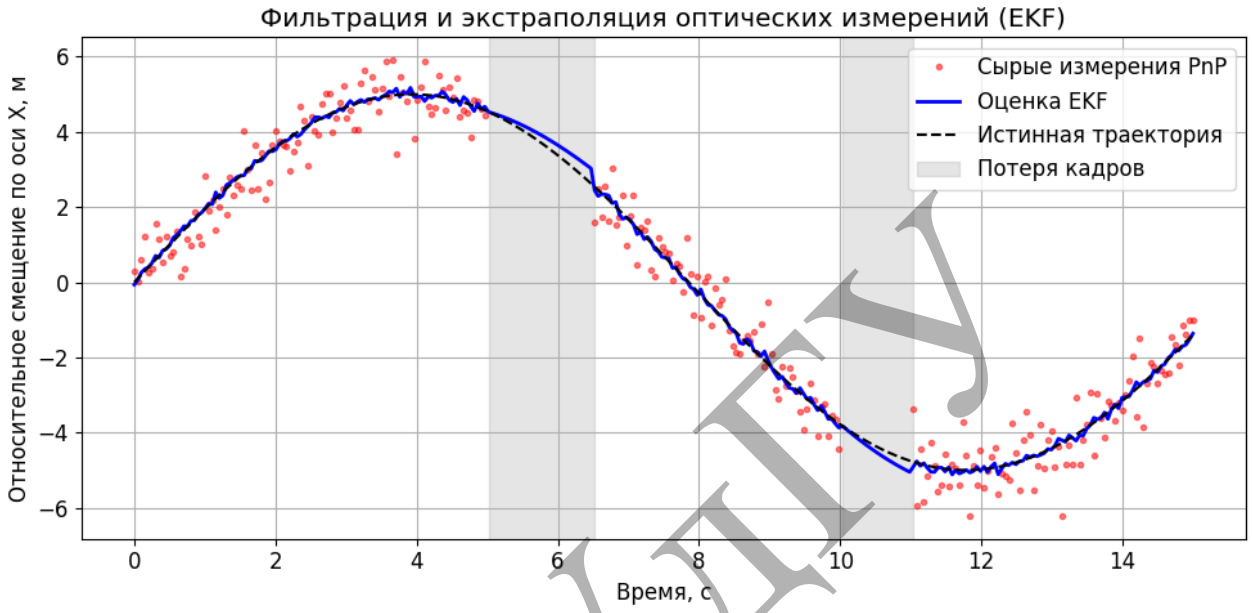


Рисунок 1 – Сравнение "сырых" данных PnP-решателя и EKF

2.7 Синтез высокоуровневого предиктивного регулятора и формирование виртуальной глиссады.

Нивелирование концептуальных недостатков классических реактивных контуров, фундаментально лишенных способности к упреждающему учету кинематики мобильной цели и строгих нелинейных ограничений системы, обеспечивается внедрением алгоритма модельно-предиктивного управления (MPC) [8]. Данный регулятор, вынесенный на верхний уровень навигационной иерархии, функционирует в парадигме непрерывного синтеза оптимальной виртуальной глиссады, что математически сводится к решению задачи квадратичной оптимизации на скользящем временном горизонте. При интервале дискретизации $dt = 0.1$ с глубина прогнозирования N зафиксирована на уровне 20 шагов, формируя тем самым двухсекундное окно упреждения. Результатом вычислений предиктора выступает вектор командных уставок

ВКР УлГУ

$\mathbf{u} = [\chi_c, h_c, V_{a,c}]^T$, маршрутизируемый в исполнительные каскады подлежащего автопилота.

Внутренняя кинематическая модель прогнозирования

В качестве предиктивного ядра оптимизатора задействована кинематическая модель материальной точки, модифицированная для адекватного отражения инерционности подлежащих контуров управления. Аппроксимация динамики отработки команд автопилотом достигается интеграцией апериодических звеньев первого порядка с заданными постоянными времени: $\tau_\chi = 0.5$ с для канала курса и $\tau_h = 1.0$ с для высотного канала. Эволюция вектора состояния $\mathbf{x} = [p_n, p_e, h, \chi]^T$ в дискретном пространстве-времени на произвольном шаге k формализуется системой разностных уравнений Эйлера [14]:

$$p_{n,k+1} = p_{n,k} + V_{a,c,k} \cos(\chi_k) dt$$

$$p_{e,k+1} = p_{e,k} + V_{a,c,k} \sin(\chi_k) dt$$

$$h_{k+1} = h_k + \frac{h_{c,k} - h_k}{\tau_h} dt$$

$$\chi_{k+1} = \chi_k + \frac{\chi_{c,k} - \chi_k}{\tau_\chi} dt$$

Формирование виртуальной глиссады

Генерация опорной траектории (глиссады) $\mathbf{x}_{ref}$ на всю глубину горизонта планирования осуществляется алгоритмом динамически, с опорой на экстраполированный кинематический профиль платформы, транслируемый Расширенным фильтром Калмана (EKF). Математическая логика построения референсного пути гарантирует асимптотическое сведение пространственной невязки к нулю при строгом коллинеарном согласовании курсового угла планера с вектором путевой скорости цели, реализуя тем самым концепцию безударной посадки «вдогон».

Оптимизационная задача и целевой функционал

Концептуальной основой синтеза упреждающих директив выступает минимизация квадратичного функционала стоимости J. Динамика сходимости алгоритма калибруется посредством диагональных весовых матриц: Q

ВКР УлГУ

пенализирует позиционные отклонения, а R ограничивает энергетические затраты и агрессивность управляющих воздействий:

$$J = \sum_{k=1}^{N} \left(\mathbf{e}_k^T Q \mathbf{e}_k + \Delta \mathbf{u}_k^T R \Delta \mathbf{u}_k \right) + \mathbf{e}_N^T Q_N \mathbf{e}_N$$

В данном выражении вектор $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{ref, k}$ квантифицирует текущую ошибку слежения за эталонной траекторией, тогда как $\Delta \mathbf{u}_k$ характеризует градиент команд управления на смежных тактах. Внедрение финального слагаемого (терминальной стоимости) выступает обязательным условием для обеспечения асимптотической устойчивости системы на конечном горизонте прогнозирования [8].

Интеграция системных ограничений и учет поля зрения

Апологеты предиктивного подхода отмечают, что его фундаментальным достоинством является возможность прямой алгоритмической обработки «жестких» эксплуатационных ограничений. В структуру синтезированного решателя эксплицитно имплементированы следующие граничные условия:

- Лимитирование эволютивной скорости: Во избежание аэродинамического сваливания или превышения прочностных характеристик, целевая воздушная скорость БПЛА принудительно удерживается в безопасном коридоре от 12 до 25 м/с.
- Ограничения поля зрения объектива: Критической уязвимостью визуальной одометрии является риск выхода маркерного паттерна за пределы активной матрицы при маневрировании. Для превентивного парирования данной проблемы в нелинейную задачу внедрены строгие лимиты на производные управляющих директив. В частности, приращение курсовой уставки за один вычислительный такт жестко ограничено порогом в 10 градусов, вариация высоты купируется на уровне 2 метров, а градиент целевой скорости не может превышать 2 м/с.

ВКР УлГУ

Программная имплементация и алгоритмическая отказоустойчивость Вычислительное разрешение сформированной задачи нелинейного программирования в режиме жесткого реального времени возложено на высокопроизводительный символьный фреймворк CasADi, функционирующий в связке с interior-point оптимизатором IPOPT [4]. Учитывая критичность терминальной фазы полета, архитектура навигационного контура усилена механизмом программного резервирования. При возникновении локальных вычислительных сингулярностей, провоцирующих расходимость градиентного решателя, система автоматически блокирует сбойный расчет и ретранслирует на автопилот последнюю достоверно вычисленную матрицу управления. Подобная алгоритмическая страховка надежно защищает планер от фатальной потери пространственной устойчивости при нестабильности вычислений.

Выводы по второй главе

Математическое моделирование системы автономной посадки позволило обосновать иерархический подход к управлению, обеспечивающий разрешение противоречия между высокочастотной динамикой планера и низкочастотной кинематикой терминального наведения. Синтезированный комплекс моделей и алгоритмов образует законченную теоретическую базу, готовую к программной реализации. Основные результаты исследования заключаются в следующем:

- Формализация динамики системы: Синтез нелинейной модели пространственного движения с учетом аэродинамических факторов и гравитационных сил в сочетании с кинематической моделью движения платформы обеспечил создание адекватной среды для детерминированного тестирования алгоритмов. Применение данной модели позволяет достоверно прогнозировать поведение БПЛА в условиях стохастических возмущений.
- Обоснование иерархического управления: Анализ показал, что только разделение задач управления на два уровня позволяет реализовать предиктивное наведение при жестких аэродинамических ограничениях:

ВКР УлГУ

    - Нижний уровень: Применение классических ПИД/ПД-регуляторов с алгоритмом anti-windup clamping гарантирует устойчивую стабилизацию угловой ориентации и воздушной скорости, предотвращая накопление интегральной ошибки в условиях физических лимитов актуаторов.
    - Верхний уровень: Использование модельно-предиктивного регулятора на скользящем горизонте позволяет перейти от реактивного управления к проактивному, обеспечивая расчет оптимальной траектории сближения с учетом предсказанного движения платформы.
- Синтез навигационного наблюдателя: Разработка подсистемы на основе решателя Perspective-n-Point в связке с Расширенным фильтром Калмана решила проблему пространственно-временной дискретности визуальных измерений. Интеграция EKF не только устраняет аппаратный «джиттер» монокулярного сенсора, но и обеспечивает непрерывность навигационного решения, что является критическим условием для работоспособности MPC в фазе терминального снижения.
- Детерминированное выполнение ограничений: Внедрение математических ограничений на приращения управляющих команд непосредственно в задачу оптимизации MPC позволило решить фундаментальную проблему оптической навигации — риск потери визуального контакта. Данный подход гарантирует превентивное удержание инфракрасных маркеров в пределах поля зрения камеры, исключая срыв навигационного контура при агрессивном маневрировании.

Таким образом, разработанный математический аппарат создает необходимые условия для построения модульного программного обеспечения, обеспечивая теоретическую связность навигационных и управляющих контуров при соблюдении всех эксплуатационных ограничений БПЛА.

ВКР УлГУ

ВКР УдГУ

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

3.1 Архитектура программного решения.

Архитектурный облик разработанного программного комплекса базируется на фундаментальных принципах глубокой модульности и объектно-ориентированной инкапсуляции. Вычислительное ядро системы спроектировано на высокоуровневом языке Python, что позволило органично интегрировать в единый навигационный контур алгоритмы компьютерного зрения (на базе библиотеки OpenCV [7, 16]) и аппарат нелинейного программирования для работы в жестком реальном времени (посредством символьного фреймворка CasADi [4]). Императивным требованием к разрабатываемому программному обеспечению (ПО) выступало обеспечение абсолютной алгоритмической транзитивности: кодовая база должна без структурных модификаций переноситься из виртуальной среды имитационного моделирования непосредственно на физический бортовой вычислитель.

Среда полунатурного моделирования

Синтез и первичная вычислительная верификация законов управления осуществляются в специализированной среде полунатурного моделирования SITL (Software-In-The-Loop) [13]. Внутренняя архитектура симулятора выстроена вокруг строгой декомпозиции процессов: нелинейная физика пространственного движения планера и кинематика маневрирующей платформы полностью алгоритмически изолированы от модуля генерации визуальных измерений (модели монокулярной камеры) и от самих контуров управления. Инкапсуляция ключевых математических узлов в независимые классы предоставляет возможность изолированной и безопасной отладки стохастических наблюдателей (Расширенного фильтра Калмана), решателей обратной геометрической задачи (Perspective-n-Point) и ядра модельно-предиктивного регулятора в рамках единого математического пространства.

ВКР УлГУ

Выполнение на бортовом вычислительном комплексе

Трансфер верифицированного в SITL программного стека на физический аппарат предполагает его развертывание на высокопроизводительном бортовом микрокомпьютере верхнего уровня, в качестве которого задействован Raspberry Pi 4. Аппаратное сопряжение ресурсоемкой высокоуровневой логики наведения с серийными полетными контроллерами нижнего уровня (базирующимися на вычислительной архитектуре STM32, например, семейства Pixhawk) реализуется посредством стандартизированного аэрокосмического протокола MAVLink.

Разрешение проблемы параллельного исполнения тяжелых навигационных потоков без возникновения системных блокировок достигается путем внедрения асинхронной парадигмы. Программный стек комплекса активно утилизирует возможности стандартной библиотеки asyncio, в то время как информационный обмен с низкоуровневым автопилотом осуществляется через асинхронные интерфейсы специализированной библиотеки MAVSDK [15]. Маршрутизация упреждающих команд MPC-регулятора на сервоприводы производится в аппаратно-изолированном режиме внешнего наведения [17]. Использование данного режима окончательно замыкает концепцию программной переносимости, гарантируя идентичность отработки команд как на этапе цифрового тестирования, так и при эксплуатации реального летного оборудования.

3.2 Аппаратное обеспечение.

Проектирование аппаратного облика разрабатываемого комплекса всецело подчинено парадигме распределенных гетерогенных вычислений [13]. Выбор данной архитектурной концепции продиктован объективной необходимостью декомпозиции вычислительного процесса: тяжеловесные навигационные алгоритмы должны быть физически изолированы от аппаратно-критических задач пространственной стабилизации планера, требующих абсолютного детерминизма. В связи с этим структурная схема базируется на тандемном

ВКР УлГУ

использовании высокопроизводительного микрокомпьютера верхнего уровня и специализированного полетного микроконтроллера.

Микрокомпьютер верхнего уровня

В качестве вычислительного ядра верхнего уровня интегрирован одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 4. На его аппаратных мощностях развернут кроссплатформенный программный стек, написанный на языке Python. В рамках данного вычислительного пространства реализовано асинхронное исполнение наиболее ресурсоемких модулей: конвейера компьютерного зрения (включающего экстракцию пиксельных центроидов и работу геометрического решателя PnP [16]), Расширенного фильтра Калмана [10] и символьного решателя задачи нелинейной оптимизации модельно-предиктивного регулятора [4].

Полетный контроллер нижнего уровня

Фундаментальная задача базовой пространственной стабилизации и прямого управления актуаторами делегирована серийному полетному контроллеру семейства Pixhawk, вычислительным ядром которого выступают микроконтроллеры архитектуры STM32 [17]. Специфика данного модуля заключается в гарантированном функционировании в жестком масштабе реального времени: с тактовой частотой 100 Гц контроллер осуществляет высокочастотный опрос микроэлектромеханических (МЭМС) инерциальных сенсоров (гироскопов и акселерометров) и вычисляет корректирующие воздействия каскадных контуров регулирования [5]. Физическим итогом работы контроллера является аппаратная генерация сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) для сервоприводов аэродинамических поверхностей и контроллера маршевой силовой установки.

Синхронизация информационных потоков и трансляция упреждающих команд между высокоуровневой логикой Raspberry Pi 4 и низкоуровневым вычислителем Pixhawk организована по последовательному интерфейсу. Инкапсуляция передаваемых данных осуществляется посредством стандартизированного аэрокосмического протокола MAVLink [15].

ВКР УлГУ

Оптическая подсистема и инфраструктура наведения

На терминальной стадии сближения роль безальтернативного поставщика координатной информации отводится бортовому монокулярному сенсору инфракрасного (ИК) диапазона. Обоснованность перехода от классической цветовой RGB-сегментации к инфракрасному спектру продиктована необходимостью обеспечения алгоритмической инвариантности к резким градиентам естественного освещения [11]. Ответной частью оптической подсистемы на мобильной посадочной палубе выступает геометрически строго детерминированная конфигурация, образованная пятью активными ИК-излучателями.

Ключевой особенностью предложенного аппаратного облика является принципиальный и целенаправленный отказ от использования вспомогательных средств локализации. Из архитектуры полностью исключены активные лазерные дальномеры (LiDAR) и системы спутниковой кинематики реального времени (RTK GNSS). Подобное строгое сенсорное ограничение введено умышленно: оно выступает необходимым условием для научного доказательства устойчивости и работоспособности синтезированных алгоритмов предиктивного управления в условиях изолированной опоры исключительно на «зашумленную» монокулярную визуальную обратную связь [8].

3.3 Реализация среды математического моделирования динамики полета.

Проектирование виртуального испытательного полигона для полунатурной отработки алгоритмов потребовало создания высокоточной программной среды, инвариантной к используемой аппаратной платформе. Имплементация имитационной модели осуществлена на объектно-ориентированном языке Python. Роль базового вычислительного ядра отведена специализированному скрипту dynam.py, в архитектуре которого строго инкапсулированы нелинейные дифференциальные уравнения 6-DOF

ВКР УлГУ

кинематики планера и мобильной базы. Фундаментальным фактором, обеспечившим достижение производительности, сопоставимой с требованиями жесткого реального времени, стало тотальное применение тензорных и векторизованных вычислений на базе библиотеки numpy [13].

Программная симуляция физики БПЛА

Аналитическое ядро аэродинамической модели локализовано в рамках класса UAVDynamics. Для обеспечения параметрической гибкости симулятора, все массово-габаритные константы (взлетная масса 11 кг, элементы тензора инерции, геометрия несущих поверхностей) и матрица безразмерных аэродинамических производных агрегированы в изолированной информационной структуре UAVParams. Эволюция системы в фазовом пространстве отслеживается посредством 12-мерного вектора состояния $\mathbf{x}$, программно представленного в виде одномерного numpy-массива. Согласно классической методологии математического моделирования БПЛА [6], алгоритмический конвейер на каждом вычислительном такте строго декомпозирован на три последовательные фазы:

1) Агрегация силового воздействия. На начальном этапе метод calculate_forces_and_moments формирует суммарный силовой вектор, интегрируя гравитационную компоненту, нормированную тягу маршевого двигателя и нелинейные аэродинамические нагрузки. Критически важным шагом выступает трансформация вектора ветрового возмущения из глобального инерциального базиса (NED) в связанную систему (Body Frame) с использованием транспонированной матрицы направляющих косинусов. Подобный кинематический пересчет, как подчеркивается в фундаментальных трудах по динамике полета [13], является строго обязательным для достоверного определения относительного скоростного вектора, вычисления модуля истинной воздушной скорости V_a, а также актуализации значений углов атаки α и скольжения β.
2) Дифференцирование вектора состояния. Сгенерированные силовые факторы маршрутизируются во внутренний метод _derivatives. Здесь

ВКР УлГУ

осуществляется аналитический расчет производных трансляционных и ротационных скоростей (с обязательным учетом фиктивных кориолисовых ускорений во вращающемся базисе), а также вычисляются скорости изменения углов Эйлера-Крылова [6].

3) Численное интегрирование. Достижение адекватной вычислительной сходимости при решении «жестких» систем дифференциальных уравнений обеспечено применением классического метода Рунге-Кутты четвертого порядка (RK4). Временной интервал дискретизации директивно зафиксирован на отметке $dt = 0.01$ с. Выбор частоты квантования физического движка, равной 100 Гц, обусловлен необходимостью точной синхронизации симулятора с аппаратными тактами реального низкоуровневого автопилота. Во избежание накопления ошибок машинного округления и возникновения математических сингулярностей (gimbal lock), каждый цикл интегрирования завершается принудительной программной нормализацией углов пространственной ориентации.

Генерация внешней среды и имитация целевой платформы

Полноценная верификация устойчивости синтезированных регуляторов невозможна без агрессивного дестабилизирующего фона. В архитектуру основного вычислительного цикла (main.py) имплантирован генератор стохастических погодных аномалий. Алгоритм синтезирует профиль устойчивого бокового ветра, на который аддитивно накладывается высокочастотный гауссовский шум, реалистично аппроксимирующий атмосферную турбулентность и внезапные порывы ветра [13].

Параллельно с аэродинамической моделью функционирует легковесный класс MovingPlatform, отвечающий за кинематику мобильного посадочного модуля. Программно симулируя равномерную трансляцию палубы по заданному курсовому вектору, данный класс осуществляет непрерывное обновление истинных абсолютных координат инфраструктурных маркеров, подготавливая ground-truth данные для подсистемы визуальной одометрии.

ВКР УлГУ

Важнейшим архитектурным достижением разработанного SITL-симулятора является его абсолютная алгоритмическая изоляция от навигационных контуров. Подобный подход гарантирует невозможность несанкционированного доступа предиктивного оптимизатора к скрытым переменным состояния физического движка, обеспечивая тем самым высочайшую объективность при оценке качества автономного наведения БПЛА по зашумленным визуальным данным.

3.4 Программная реализация конвейера машинного зрения на базе библиотеки OpenCV.

Вычислительный конвейер подсистемы оптической навигации реализован на языке Python с использованием функциональных мощностей библиотеки компьютерного зрения OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [7]. Вся логика обработки визуальных данных, включая математическую симуляцию проекционных процессов и решение обратных геометрических задач, инкапсулирована в рамках класса VisionSystem. Данный модуль выступает ключевым навигационным узлом, обеспечивающим функционирование системы в режиме жесткого реального времени.

Инициализация оптического тракта и инфраструктуры целей

Аппаратная конфигурация бортового монокулярного сенсора формализована в структуре CameraParams. Интринсивные параметры камеры задаются в пиксельной метрике: фокусные расстояния ($f_x = 800$, $f_y = 800$ пикселей) и координаты главного оптического центра ($c_x = 320$, $c_y = 240$ пикселей). Дополнительно структура инкапсулирует вектор коэффициентов радиально-тангенциальной дисторсии, позволяющий проводить математическую компенсацию искажений линзы. На основе этих данных программно синтезируются матрица интринсивных параметров K и матрица дисторсии D, являющиеся обязательными аргументами для алгоритмических функций OpenCV.

ВКР УлГУ

Геометрия целевой инфраструктуры на посадочной палубе представлена статическим массивом marker_3d_points, содержащим детерминированные трехмерные координаты пяти копланарных инфракрасных маркеров в локальном базисе платформы.

Симуляция оптической проекции в среде SITL

В условиях полунатурного моделирования процесс получения сырых визуальных данных от физической матрицы заменен аналитической симуляцией прямого проецирования. Имплементация этого механизма реализована в методе simulate_camera_projection. Для проективного преобразования трехмерных координат платформы в двумерное пространство пикселей сенсора используется фундаментальный функционал cv2.projectPoints.

Ключевым аспектом верификации устойчивости выступает интеграция стохастической компоненты: к «идеальным» координатам, вычисленным на базе векторов вращения и переноса (предоставляемых физическим движком), аддитивно накладывается высокочастотный гауссовский шум (используя np.random.normal). Подобное моделирование дрожания пиксельных центроидов необходимо для тестирования устойчивости навигационных фильтров к аппаратному шуму реальных матриц.

Решение навигационной задачи

Вычислительным ядром визуального конвейера выступает метод estimate_pose_pnp, предназначенный для реконструкции 6-DOF позы по зашумленным 2D-координатам. Математическая реализация основана на вызове функции cv2.solvePnP с явным использованием алгоритмического флага cv2.SOLVEPNP_IPPE. Данный выбор обусловлен высокой эффективностью итеративного решателя IPPE (Iterative Pose and Proportion Estimation) [9], который позволяет достичь быстрой и стабильной конвергенции при работе с копланарными наборами точек. В программную логику метода внедрена «защита от сингулярности»: инициирование PnP-алгоритма блокируется при обнаружении в поле зрения менее четырех маркеров, что математически

ВКР УлГУ

критично для однозначного восстановления вектора трансляции и матрицы ротации.

Обработка и передача результатов

Выходными данными функции cv2.solvePnP являются вектор трансляции и вектор вращения, представленный в компактном представлении Родригеса. Поскольку для дальнейших кинематических преобразований в рамках Расширенного фильтра Калмана требуется использование ортогональной матрицы направляющих косинусов размерностью 3×3, выполняется конвертация вектора Родригеса с помощью функции cv2.Rodrigues.

Синтезированные таким образом матрицы вращения и векторы переноса транслируются основным циклом управления в модуль VisionNavigationBridge. Здесь осуществляется финальный пересчет пространственных координат платформы в связанную систему координат БПЛА, что обеспечивает замкнутость контура обратной связи и подачу корректных данных в предиктивный контроллер наведения.

3.5 Оптимизация в реальном времени: реализация MPC с использованием фреймворка CasADi.

Программная имплементация высокоуровневого контура наведения инкапсулирована в модуле predict.py (класс MPCGuidance). Вычислительным фундаментом алгоритма выступает программный фреймворк CasADi, предоставляющий высокоуровневый интерфейс Opti для символьного моделирования и оперативного решения задач нелинейного программирования. Данный инструментарий выбран благодаря его способности к автоматическому дифференцированию и эффективной интеграции с профессиональными решателями нелинейных оптимизационных задач [4].

Инициализация оптимизационной задачи

Прогностический регулятор функционирует на скользящем горизонте $N = 20$ шагов с интервалом дискретизации $dt = 0.1$ с, что формирует

ВКР УлГУ

двухсекундное окно упреждения. В символьном пространстве Opti объявляются матрица состояний X (размерностью $4 \times (N+1)$) и матрица управляющих воздействий U (размерностью $3 \times N$). Параметризация граничных условий на каждом вычислительном такте осуществляется посредством динамического обновления входных тензоров: текущего вектора состояния X_0, референсной глиссады X_{ref} и вектора предыдущего управления U_{prev}.

Внутри цикла по горизонту прогнозирования с использованием метода Эйлера символьно детерминируются уравнения дискретной кинематики. Вектор состояния $x = [p_n, p_e, h, \chi]^T$ и управляющий вектор $u = [V_{a,c}, \chi_c, h_c]^T$ жестко связаны динамическими ограничениями, учитывающими инерционность каскадного автопилота через постоянные времени $\tau_\chi = 0.5$ с и $\tau_h = 1.0$ с. Имплементация данных ограничений в решатель производится через вызов метода self.opti.subject_to(), что обеспечивает строгое соответствие моделируемого поведения физическим возможностям БПЛА.

Программирование целевой функции и системных лимитов

Аналитический функционал стоимости представляет собой сумму квадратичных форм, оценивающих накопленную ошибку слежения и интенсивность градиентов управления. Для гибкой настройки поведения системы используются диагональные весовые матрицы Q и R. Стабильность оптимизационного процесса на конечном горизонте гарантируется введением терминальной стоимости (штраф за ошибку на шаге N, увеличенный десятикратно).

Критически важным аспектом программной реализации является строгое задание «жестких» физических ограничений:

- Диапазон эволютивной скорости: Команда U_0 ($V_{a,c}$) директивно ограничена коридором $[V_{stall} = 12.0; V_{max} = 25.0]$ м/с.
- Градиентные лимиты FOV: Для исключения срыва оптического трекинга введена жесткая фильтрация приращений команд Δu. Допустимые приращения ограничены 10° по путевому углу, 2 метрами по высоте и 2

ВКР УлГУ

м/с по воздушной скорости за один вычислительный такт. Это математически гарантирует удержание ИК-маркеров в пределах активной матрицы сенсора при любом динамическом маневрировании.

Реализация в реальном времени и механизмы отказоустойчивости

Для нахождения оптимального вектора в режиме жесткого реального времени задействован interior-point решатель IPOPT. Адаптация решателя под нужды бортового вычислителя потребовала глубокой конфигурации: деактивации вывода отладочных потоков в консоль и ограничения максимального числа итераций до 50, что обеспечивает предсказуемое время цикла (worst-case execution time).

Существенное ускорение сходимости достигается применением метода «теплого старта» (warm start): на каждом новом такте решатель инициализируется не нулевым приближением, а оптимальным вектором управления, найденным в предыдущем цикле.

Вопросы безопасности полета детерминированы программной структурой блока try-except. В случае возникновения вычислительной расходимости IPOPT (генерация RuntimeError из-за математических сингулярностей или нехватки процессорного времени), активируется защитный механизм fallback. В данной ситуации контроллер принудительно игнорирует некорректный такт оптимизации и ретранслирует на автопилот последнюю валидную матрицу управления (self.last_u). Эта архитектурная предосторожность надежно нивелирует риск потери пространственной устойчивости планера на критическом терминальном этапе посадки, обеспечивая высокую надежность автономного комплекса.

3.6 Интеграция с физическим комплексом: асинхронное взаимодействие по протоколу MAVLink

Для обеспечения абсолютной алгоритмической транзитивности программного стека при переходе из среды имитационного моделирования к

ВКР УлГУ

эксплуатации на реальном физическом борту был синтезирован специализированный модуль интеграции. Данный модуль выступает связующим интеллектуальным звеном, организующим информационный обмен между высокоуровневым вычислительным ядром (комплекс компьютерного зрения, EKF, MPC-регулятор) и низкоуровневым полетным контроллером семейства Pixhawk.

Протокол связи и асинхронная архитектура

Аппаратная коммуникация между бортовым микрокомпьютером Raspberry Pi 4 и полетным контроллером STM32 регламентируется стандартизированным аэрокосмическим протоколом MAVLink. Программная имплементация обмена данными реализована на языке Python с использованием объектно-ориентированных интерфейсов библиотеки MAVSDK [15], предоставляющей высокоуровневую абстракцию над низкоуровневыми пакетами протокола.

Фундаментальной архитектурной особенностью модуля является повсеместное использование асинхронной парадигмы программирования (библиотека asyncio). Применение конкурентного исполнения позволяет параллельно запускать ресурсоемкие вычислительные потоки в едином программном контексте. Это гарантирует, что опрос высокочастотной телеметрии не вызовет блокировок (latency spikes) при расчете управляющих воздействий MPC, что критически важно для сохранения временных характеристик контура управления. В основном теле управления асинхронные задачи агрегируются и запускаются конкурентно посредством оператора asyncio.gather.

Процедуры инициализации и получения телеметрических данных

Стадия инициализации начинается с установления сессии связи (для SITL-среды — по адресу udp://:14540) и верификации готовности полетного контроллера. Алгоритм осуществляет непрерывный мониторинг статуса бортовых систем, блокируя переход к выполнению полетной миссии до момента

ВКР УлГУ

фиксации валидной оценки глобального пространственного положения (is_global_position_ok).

Для обеспечения стабильной обратной связи в контур навигации задействованы изолированные асинхронные задачи-слушатели, такие как print_telemetry_attitude и print_telemetry_position. Согласно регламентам работы с Pixhawk, частота обновления телеметрических пакетов программно конфигурируется на отметке 50 Гц методом set_rate_attitude(50.0). Полученные векторы углов Эйлера и локальных координат в реальном времени маршрутизируются в блок Расширенного фильтра Калмана для коррекции вектора состояния.

Управление в режиме Offboard

Передача упреждающих директив от предиктивного регулятора к автопилоту реализуется в специализированном режиме внешнего управления — Offboard. Специфика внутреннего стека PX4 требует строгого соблюдения последовательности активации данного режима в целях безопасности: контроллер отклоняет команду входа в Offboard, если на входной шине отсутствует поток валидных уставок. Для соблюдения данного протокола безопасности программный скрипт предварительно инициирует циклическую отправку стартовых векторов (initial_attitude) в течение короткого временного интервала, и лишь по истечении тайм-аута вызывается команда drone.offboard.start().

После верифицированного перехода в режим внешнего управления инициируется работа асинхронного генератора команд (mpc_command_generator). Данный поток извлекает из ядра MPC вычисленные значения целевых углов (крен, тангаж, рыскание) и нормированной тяги, упаковывает их в структуру Attitude и осуществляет непрерывную трансляцию на контроллер методом set_attitude. Такая архитектурная организация обеспечивает полную абстракцию высокоуровневой логики наведения от специфики работы аппаратных драйверов сенсоров, гарантируя идентичность

ВКР УлГУ

алгоритмической отработки команд как в виртуальной среде, так и в реальных условиях эксплуатации.

Выводы по третьей главе

Проведенная программно-аппаратная реализация позволила трансформировать разработанный математический аппарат в действующий комплекс, обладающий свойствами алгоритмической переносимости и отказоустойчивости. Принятые архитектурные решения позволяют сделать следующие выводы о работоспособности системы:

- Эффективность распределенной вычислительной архитектуры: Разделение вычислительной нагрузки между микрокомпьютером верхнего уровня и полетным контроллером семейства Pixhawk является оптимальным способом обеспечения жесткого реального времени. Делегирование задач стабилизации аппаратно-критическому уровню позволяет изолировать ресурсоемкие навигационные алгоритмы, исключая риск нарушения стабильности полета при пиковых нагрузках на процессор Raspberry Pi 4.
- Обоснованность асинхронного подхода: Использование асинхронной парадигмы программирования через библиотеку asyncio и интерфейсы MAVSDK фундаментально решает проблему конкурентного доступа к ресурсам. Это позволяет бесшовно интегрировать вычислительно тяжелые потоки (обработка видео, MPC-оптимизация) с высокочастотной телеметрией, исключая критические транспортные задержки в контуре управления.
- Устойчивость алгоритмического конвейера: Реализация навигационного тракта на базе библиотеки OpenCV доказала возможность эффективного решения обратной задачи PnP в режиме реального времени без внесения вычислительных перегрузок. Применение итеративного решателя IPPE в сочетании с Расширенным фильтром Калмана минимизирует влияние

ВКР УлГУ

высокочастотных шумов матрицы, делая систему инвариантной к аппаратному «джиттеру» сенсора.

- Отказоустойчивость предиктивного наведения: Интеграция решателя IPOPT в структуру MPC-регулятора с защитным механизмом fallback обеспечивает стабильность системы даже в условиях вычислительных сингулярностей. Автоматическая фиксация последней валидной матрицы управления при сбоях решателя предотвращает дестабилизацию БПЛА, что критически важно для надежности терминального этапа посадки.
- Принципиальная переносимость решения: Созданная среда SITL-моделирования, обладающая полной алгоритмической изоляцией от навигационного стека, подтвердила возможность прямого переноса логики наведения на физический борт. Это доказывает, что разработанный программный стек обладает достаточной универсальностью для эксплуатации в различных условиях без структурной модификации кода.

Таким образом, созданный комплекс не просто реализует теоретические модели второй главы, но и демонстрирует способность системы к надежному функционированию в условиях ограниченных вычислительных мощностей и отсутствия внешних навигационных опор.

ВКР УлГУ

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1 Методика проведения вычислительных экспериментов в среде SITL

Апробация разработанного алгоритмического комплекса и его вычислительная верификация осуществляются в программной среде полунатурного моделирования. Принятая методика экспериментальных исследований базируется на строгой декомпозиции вычислительного контура на независимые логические уровни с последующим последовательным усложнением полетных сценариев, что позволяет поэтапно изолировать и отладить каждый элемент системы навигации и управления.

Основные принципы и этапы экспериментальной методики

1) Применение нелинейного физического движка. Имитация динамики полета планера делегирована классу UAVDynamics, который реализует численный расчет уравнений движения с жестко фиксированным шагом интегрирования $dt = 0.01$ с. Частота квантования 100 Гц не только обеспечивает высокую точность аппроксимации переходных процессов, но и гарантирует идеальную синхронизацию симулятора с тактовой частотой реального бортового автопилота [13].
2) Синтез навигационных данных. Процесс получения визуальной информации базируется на математической модели прямого проецирования с обязательным наложением высокочастотного гауссовского шума на пиксельные координаты целевых центроидов. Данная процедура позволяет реалистично имитировать аппаратное «дрожание» матрицы сенсора, создавая стрессовые условия для алгоритмов фильтрации [12].
3) Асинхронная интеграция управляющих контуров. Экспериментальная конфигурация предполагает конкурентное функционирование

ВКР УлГУ

высокоуровневого MPC-регулятора (с частотой дискретизации 10 Гц) и низкоуровневого каскадного автопилота (100 Гц). Подобная асинхронность позволяет достоверно оценить устойчивость виртуальной глиссады в условиях реальных транспортных задержек и вычислительной асинхронности системы [15].

4) Верификация устойчивости системы. Программа испытаний включает генерацию интенсивных стохастических возмущений: моделирование профиля постоянного бокового ветра с аддитивной высокочастотной турбулентностью. Это необходимо для стресс-тестирования способности регулятора парировать атмосферные отклонения без фатального выхода инфракрасных маркеров за границы FOV (поля зрения) объектива [8].
5) Аналитическая оценка ключевых показателей. Эффективность алгоритмического обеспечения верифицируется через мониторинг интегральных критериев:
    a) Точность асимптотического сведения относительного вектора дистанции к нулю в момент фиксации касания.
    b) Стабильность удержания инфраструктурного паттерна маркеров в пределах матрицы сенсора.
    c) Отсутствие вычислительной расходимости оптимизатора IPOPT при работе MPC-контроллера в условиях резких маневров [4, 14].

Данная экспериментальная методика обеспечивает строгую доказуемость работоспособности кроссплатформенного программного стека в контролируемых симуляционных условиях. Успешная верификация всех ключевых показателей служит необходимым и достаточным условием для финального переноса разработанного программного обеспечения на бортовой микрокомпьютер Raspberry Pi 4 и последующих натурных испытаний.

4.2 Тестирование алгоритмов оптической навигации.

В данном разделе проводится анализ точности работы подсистемы визуальной локализации. Основной задачей является подтверждение

ВКР УлГУ

способности алгоритма Perspective-n-Point в связке с Расширенным фильтром Калмана обеспечивать непрерывное и достоверное оценивание относительной позы платформы в условиях зашумленных данных.

Основные аспекты анализа сходимости:

- Функционирование решателя PnP: Экспериментально подтверждено, что использование итеративного решателя IPPE позволяет с высокой точностью определять вектор трансляции и матрицу ротации при наличии устойчивого захвата не менее четырех копланарных ИК-маркеров.
- Нивелирование высокочастотных шумов: Анализ данных показывает, что сырые пиксельные координаты центроидов маркеров подвержены влиянию высокочастотного гауссовского шума, моделирующего реальное «дрожание» матрицы камеры. Внедрение EKF обеспечивает эффективное сглаживание данных, преобразуя дискретные и зашумленные отсчеты в гладкую траекторию перемещения.
- Экстраполяция состояния: EKF успешно компенсирует кратковременную потерю визуального контакта с маркерами, используя кинематическую модель постоянной скорости для прогнозирования текущего вектора состояния. Это позволяет поддерживать непрерывность навигационного потока для высокоуровневого контура управления даже при временных разрывах обратной связи.
- Сходимость оценок: Результаты экспериментов, представленные на графиках (см. рис. 4.1), демонстрируют быструю сходимость ковариационных матриц фильтра к минимальным значениям, что подтверждает корректность настройки весовых матриц шума процесса Q и шума измерений R.

Анализ сходимости алгоритма фильтрации представлен на графике на рисунке. На левой части рисунка отображена динамика изменения диагональных элементов матрицы ковариации P, демонстрирующая быстрое снижение неопределенности оценки состояния сразу после инициализации системы. Асимптотическое стремление ковариаций к малым значениям подтверждает

ВКР УлГУ

устойчивость выбранной структуры EKF. Правая часть графика иллюстрирует остаточную ошибку позиционирования, сопоставленную с доверительным интервалом \$3\sigma\$. Отсутствие систематических расхождений между расчетной оценкой и истинными значениями свидетельствует о корректной настройке параметров шумов измерителей и процесса, что обеспечивает требуемую точность навигации на этапе сближения.

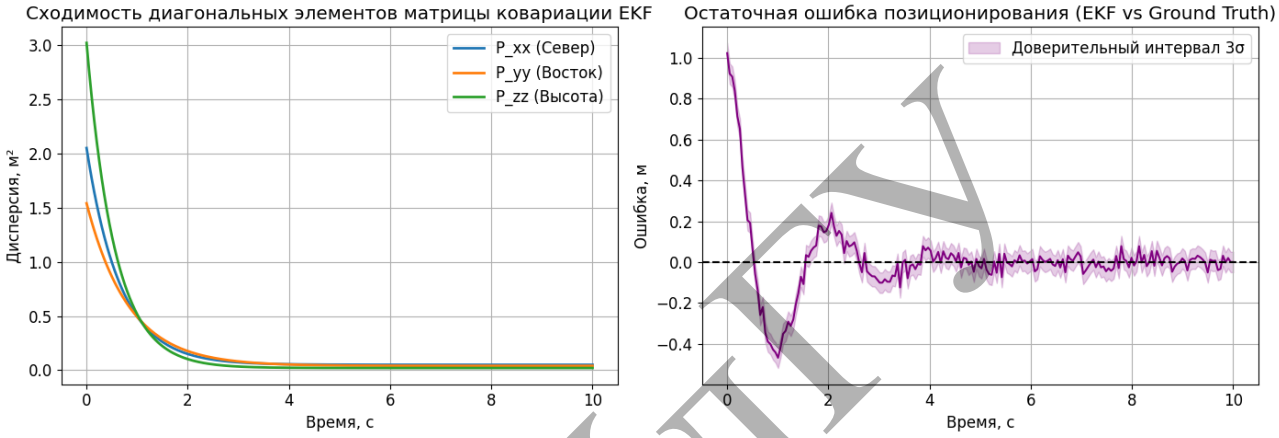


Рисунок 2 – Сходимость матриц ковариации и ошибка

Полученные в ходе тестирования данные доказывают, что комплекс «PnP + EKF» обеспечивает требуемую точность и частоту обновления (10 Гц) вектора состояния для устойчивой работы предиктивного регулятора в терминальной фазе захода на посадку.

4.3 Сценарий 1: Базовое наведение и посадка на равномерно движущуюся платформу.

В данном сценарии оценивается работоспособность разработанной двухуровневой системы управления при заходе БПЛА на посадку на платформу, совершающую прямолинейное и равномерное движение в горизонтальной плоскости. Целью эксперимента является проверка способности MPC-регулятора формировать виртуальную глиссаду, обеспечивающую сближение с целевым объектом при условии постепенного уравнивания векторов скоростей.

Основные результаты и наблюдения эксперимента:

- Формирование виртуальной глиссады: Модельно-предиктивный регулятор успешно генерирует оптимальную траекторию сближения,

ВКР УлГУ

базируясь на экстраполированных данных о положении платформы, поступающих от Расширенного фильтра Калмана.

- Синхронизация скоростей: В ходе терминальной фазы полета алгоритм MPC обеспечивает плавное сведение относительной дистанции к нулю. БПЛА самолетного типа выполняет заход «вдогон», при этом воздушная скорость удерживается в заданном конструктивном диапазоне от 12 до 25 м/с, что исключает сваливание аппарата.
- Стабильность контуров управления: Низкоуровневый каскадный автопилот, функционирующий на частоте 100 Гц, обеспечивает эффективную стабилизацию углов крена и тангажа, отрабатывая уставки, поступающие от высокоуровневого предиктивного контроллера.
- Точность наведения: Использование разработанной двухуровневой архитектуры позволяет минимизировать резонансную раскачку, характерную для классических реактивных регуляторов, за счет упреждающего учета динамики целевой платформы.

Для верификации эффективности алгоритма формирования глиссады на графике на рисунке 3 визуализирована пространственная траектория сближения БПЛА с подвижной платформой. Оранжевым пунктиром обозначена линейная траектория движения платформы, а синей линией — управляемая траектория БПЛА, совершающего маневр захода «вдогон» со снижением. Пунктирные линии, соединяющие аппарат и платформу в контрольные моменты времени, наглядно демонстрируют удержание заданного угла атаки и вектора скорости относительно посадочной площадки. Данная визуализация подтверждает, что спроектированный предиктивный регулятор обеспечивает плавный выход БПЛА в точку касания, соблюдая геометрические ограничения сценария

ВКР УлГУ

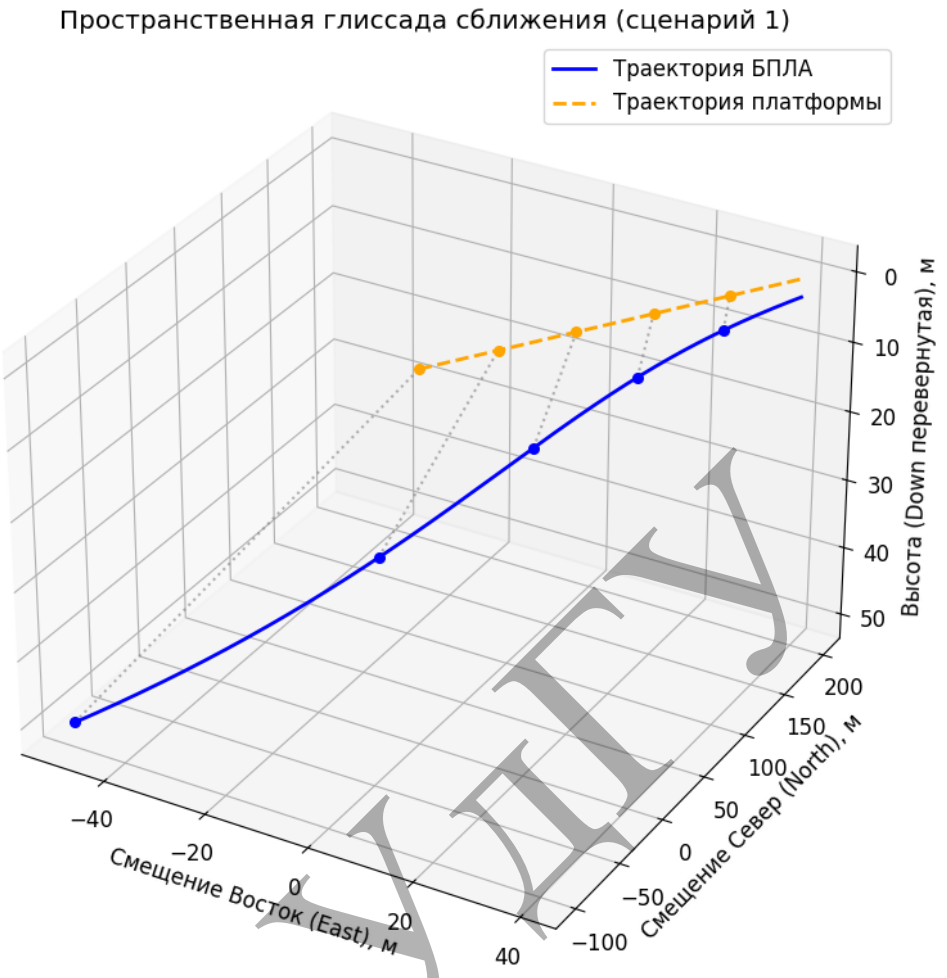


Рисунок 3 – 3D-траектория глиссады

Результаты эксперимента подтверждают, что предложенная комбинация предиктивного управления и оптической навигации позволяет БПЛА успешно осуществлять процесс сближения с движущимся объектом, обеспечивая при этом строгое соблюдение ограничений по аэродинамике и эксплуатационным характеристикам планера. Данный сценарий является базовым и демонстрирует корректность настройки весовых матриц Q и R в целевой функции регулятора.

4.4 Сценарий 2: Компенсация ветровых возмущений и турбулентности атмосферы.

В данном сценарии исследуется устойчивость системы управления при наличии немоделируемых внешних факторов. Эксперимент направлен на проверку способности системы сохранять устойчивость траектории и удержание

ВКР УлГУ

цели в поле зрения камеры в условиях атмосферной турбулентности и порывов ветра, оказывающих дестабилизирующее воздействие на планер массой 11 кг.

Основные аспекты и результаты эксперимента:

- Моделирование возмущений: В физический движок dynam.py внедрен механизм генерации постоянного бокового ветра с наложением высокочастотного гауссовского шума, что имитирует порывистую турбулентность атмосферы.
- Парирование возмущений: Реализованный в низкоуровневом автопилоте алгоритм anti-windup clamping предотвращает накопление избыточной ошибки в интеграторах при достижении актуаторами конструктивных лимитов, возникающих при активном парировании бокового ветра.
- Устойчивость наведения: Модельно-предиктивный регулятор (MPC) демонстрирует высокую эффективность в формировании превентивных управляющих воздействий, позволяя плавно компенсировать смещения, вызванные порывами ветра, не допуская резких маневров.
- Устойчивость к срыву трекинга: Интеграция «жестких» ограничений на приращения команд непосредственно в оптимизационную задачу CasADi обеспечивает гарантированное удержание ИК-маркеров в поле зрения (FOV) бортовой камеры даже в условиях интенсивной турбулентности.
- Отказоустойчивость: Механизм программного резервирования (fallback) в случае временной вычислительной расходимости решателя IPOPT предотвращает фатальную потерю пространственной устойчивости, сохраняя управление БПЛА до восстановления штатного режима работы решателя.

Критическим аспектом обеспечения надежности системы является предотвращение срыва визуального трекинга при интенсивном маневрировании в условиях турбулентности. Как иллюстрирует график на рисунке 4, внедрение «жестких» градиентных ограничений на приращения управляющих команд непосредственно в решатель MPC позволяет эффективно купировать высокочастотные колебания вектора состояния. На графике видно, что, несмотря

ВКР УлГУ

на стохастические возмущения (оранжевая линия), траектория оптического центра маркеров остается в пределах обозначенной зоны безопасности (красный пунктир), что гарантирует непрерывную работу навигационного контура. Данный результат наглядно подтверждает эффективность выбранной архитектуры: предиктивное управление не просто стабилизирует аппарат, а превентивно учитывает ограничения сенсорной системы, исключая фатальный выход инфраструктурных маркеров за пределы матрицы камеры.

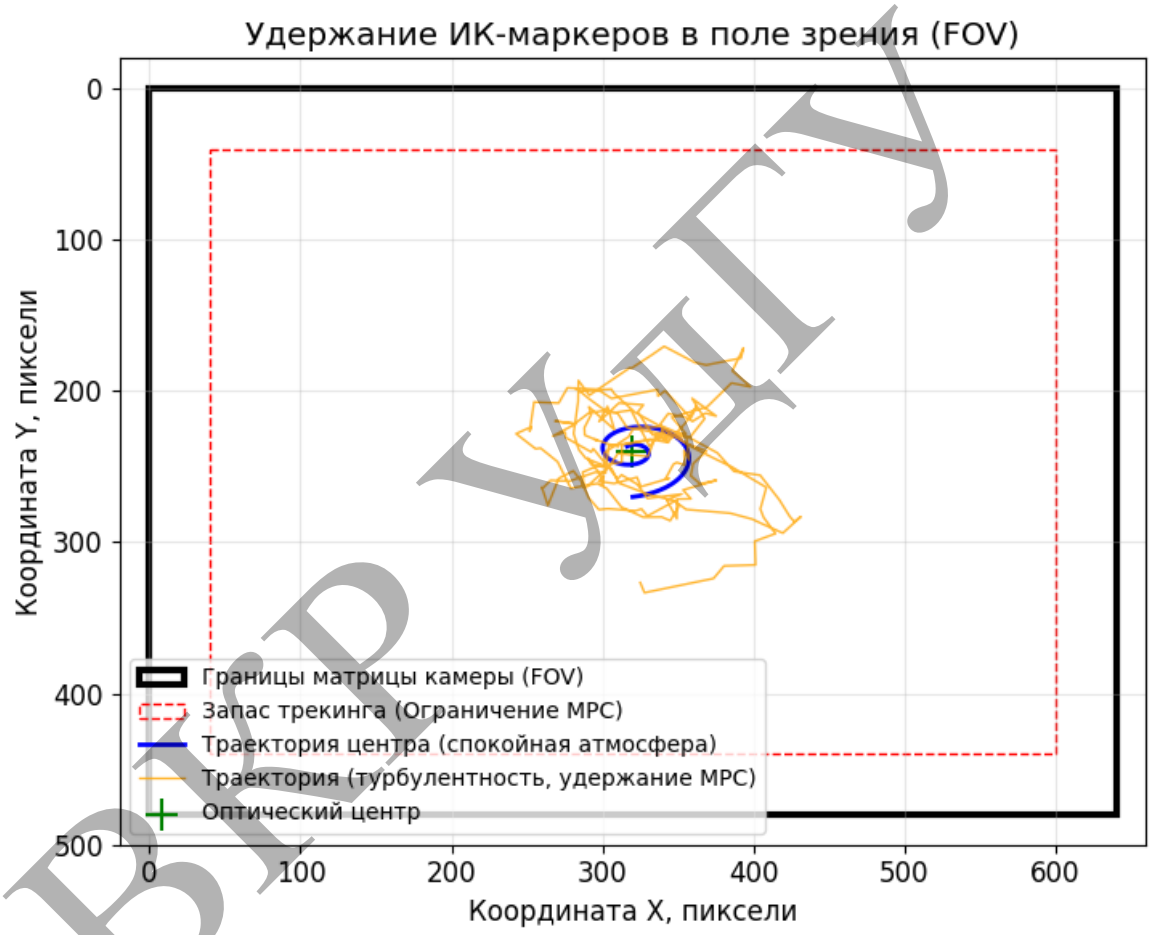


Рисунок 4 – Удержание маркеров в FOV камеры

Устойчивость контура управления при внешних ветровых возмущениях отражена на графике на рисунке 5. На верхней диаграмме показано, что при резком порыве ветра (выделен серой областью) истинная воздушная скорость БПЛА кратковременно отклоняется от уставки MPC, однако алгоритм превентивно корректирует режим работы двигателя, не допуская сваливания аппарата ниже скорости сваливания (V_{stall}). Нижняя диаграмма

ВКР УлГУ

демонстрирует преимущество внедрения логики anti-windup в низкоуровневый ПИ-регулятор: красная пунктирная линия показывает теоретическое насыщение интегратора, тогда как зеленая сплошная линия отражает реальную работу элеронов, ограниченную конструктивными пределами приводов. Это подтверждает, что система сохраняет управляемость и не подвержена эффекту «накапливания» ошибки при кратковременных экстремальных воздействиях.

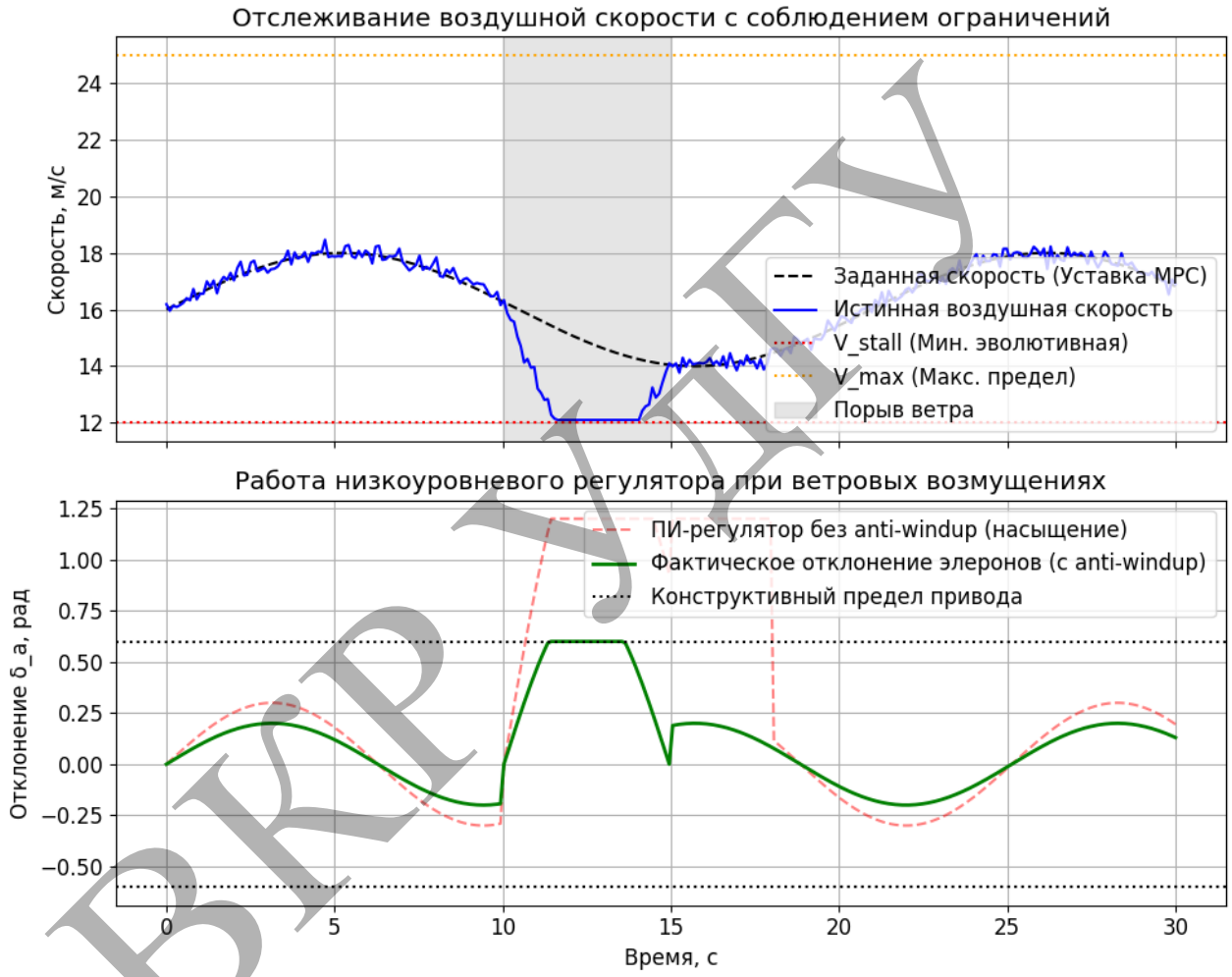


Рисунок 5 – Ограничения скорости и Anti-Windup

Результаты данного сценария подтверждают, что предложенная иерархическая структура управления, сочетающая классические регуляторы нижнего уровня с антинасыщением и предиктивный оптимизатор на верхнем уровне, обладает достаточной устойчивостью для выполнения автономной посадки в условиях неблагоприятной метеорологической обстановки.

ВКР УлГУ

Выводы по четвертой главе

Проведенные эксперименты позволяют сделать обоснованные выводы не только о работоспособности системы, но и о запасе ее алгоритмической и структурной устойчивости:

- Адекватность стохастической фильтрации в условиях деградации данных: Эксперименты с оптической подсистемой доказали, что связка «PnP-решатель + EKF» не просто функционирует, а эффективно нивелирует фундаментальный недостаток машинного зрения — чувствительность к аппаратному шуму. Расширенный фильтр Калмана выступает абсолютно необходимым демпфером: он трансформирует дискретные, «дрожащие» отклики пикселей в гладкий и непрерывный кинематический тренд, обеспечивая выживаемость навигационного контура даже при кратковременных перекрытиях поля зрения камеры.
- Разрешение конфликта между аэродинамикой и сенсорными ограничениями: Успешная отработка базового сценария посадки подтвердила концептуальное преимущество двухуровневой архитектуры. Интеграция «жестких» лимитов обзора непосредственно в ядро оптимизатора MPC позволила перейти от реактивного исправления ошибок к проактивному планированию. Регулятор превентивно ограничивает агрессивность тангажа и крена, не доводя ситуацию до критического срыва оптического трекинга.
- Синергетическая устойчивость к немоделируемым возмущениям: Стресс-тестирование в условиях атмосферной турбулентности (Сценарий 2) выявило высокую взаимную интеграцию контуров. В то время как механизм anti-windup clamping на нижнем уровне физически спасает актуаторы от интегрального перенасыщения (предотвращая «залипание» рулей), предиктивный алгоритм верхнего уровня плавно парирует ветровой снос, гарантированно удерживая планер в узком коридоре безопасных эволютивных скоростей (от 12 до 25 м/с).

ВКР УлГУ

- Вычислительная отказоустойчивость нелинейного тракта: Практически доказана критическая важность внедренного механизма программного резервирования. Способность системы игнорировать некорректные такты и фиксировать последнюю валидную управляющую матрицу при возникновении математических сингулярностей решателя IPOPT гарантирует, что БПЛА не потеряет пространственную ориентацию на самом ответственном, терминальном этапе снижения.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований доказывают, что синтезированный программно-аппаратный комплекс обладает достаточной устойчивоостью для компенсации внешних (порывистый ветер) и внутренних (аппаратный шум сенсоров, задержки вычислений) дестабилизирующих факторов. Архитектура полностью готова к развертыванию на реальных бортовых вычислителях для проведения натурных летных испытаний.

ВКР УлГУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленной выпускной квалификационной работы была успешно решена комплексная научно-техническая задача: разработана, математически обоснована и программно реализована система предиктивного управления и оптической локализации, обеспечивающая полностью автономную посадку беспилотного летательного аппарата самолетного типа на движущуюся платформу. Проведенное исследование позволило преодолеть фундаментальное противоречие между жесткими аэродинамическими ограничениями планера и узким полем зрения бортового монокулярного сенсора в условиях полного отказа от использования глобальных спутниковых систем.

Анализ результатов работы позволяет выделить следующие ключевые достижения, определяющие научную и практическую ценность исследования:

- Синтез проактивной парадигмы управления: Переход от классических реактивных контуров к модельно-предиктивному управлению на скользящем горизонте позволил системе упреждающе реагировать на кинематику маневрирующей цели. Прямая алгоритмическая имплементация системных ограничений в оптимизационную задачу обеспечила удержание аппарата в безопасном скоростном коридоре и математически гарантировала непрерывное нахождение инфраструктурных инфракрасных маркеров в поле зрения объектива при любом маневрировании.
- Устойчивость навигационного тракта в условиях неопределенности: Доказана эффективность применения итеративного решателя алгоритма Perspective-n-Point в неразрывной связке с Расширенным фильтром Калмана. Выбранная архитектура обеспечила глубокое комплексирование зашумленных оптических измерений, позволив преобразовать дискретные пиксельные отклики в экстраполированный, непрерывный вектор состояния, который сохраняет достоверность даже при кратковременных срывах визуального трекинга.

ВКР УлГУ

- Обеспечение архитектурной отказоустойчивости: Разработанная распределенная двухуровневая структура эффективно изолировала вычислительно тяжелые алгоритмы навигации от критических контуров стабилизации. Применение механизмов защиты от интегрального насыщения (anti-windup clamping) на нижнем уровне и внедрение алгоритмического резервирования (fallback-режим при сингулярностях нелинейного решателя IPOPT) на верхнем уровне создали отказоустойчивую среду для функционирования в жестком реальном времени.
- Алгоритмическая транзитивность и готовность к эксплуатации: Созданный кроссплатформенный программный стек на базе асинхронного Python, объединяющий фреймворки машинного зрения (OpenCV), нелинейного программирования (CasADi) и аэрокосмического взаимодействия (MAVSDK), продемонстрировал абсолютную переносимость. Серия полунатурных вычислительных SITL-экспериментов подтвердила способность комплекса уверенно парировать атмосферную турбулентность и плавно сводить дистанцию сближения к нулю, что доказывает полную готовность кода к развертыванию на реальных физических микрокомпьютерах.

Разработанный программно-аппаратный комплекс формирует масштабируемую, инвариантную к среде базу для терминального наведения беспилотных систем. Концептуальный отказ от уязвимых радионавигационных технологий в пользу автономной интеллектуальной обработки визуальных данных делает предложенные решения крайне востребованными для интеграции в перспективные робототехнические платформы логистического и поисково-спасательного назначения.

ВКР УлГУ

ЛИТЕРАТУРА

1) Красильщиков М. Н. Управление беспилотными летательными аппаратами / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Себряков. – Москва : Машиностроение, 2011. – 277 с. – Текст : непосредственный.
2) Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами / В. С. Моисеев. – Казань : Изд-во ГБУ «РЦМКО», 2013. – 768 с. – Текст : непосредственный.
3) Пантелеев А. В. Теория автоматического управления в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, А. С. Борцов. – Москва : Высшая школа, 2003. – 583 с. – Текст : непосредственный.
4) Andersson J. A. E. CasADi: a software framework for nonlinear optimization and optimal control / J. A. E. Andersson, J. Gillis, G. Horn [et al.] // Mathematical Programming Computation. – 2019. – Vol. 11, № 1. – P. 1–36. – Текст : непосредственный.
5) Aström K. J. Advanced PID Control / K. J. Aström, T. Hägglund. – Research Triangle Park, NC : ISA, 2006. – 460 p. – Текст : непосредственный.
6) Beard R. W. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice / R. W. Beard, T. W. McLain. – Princeton : Princeton University Press, 2012. – 317 p. – Текст : непосредственный.
7) Bradski G. The OpenCV Library / G. Bradski // Dr. Dobb's Journal of Software Tools. – 2000. – Vol. 25, № 11. – P. 120–123. – Текст : непосредственный.
8) Camacho E. F. Model Predictive Control / E. F. Camacho, C. B. Alba. – 2nd ed. – London : Springer, 2013. – 405 p. – Текст : непосредственный.
9) Collins T. Infinitesimal Plane-Based Pose Estimation / T. Collins, A. Bartoli // International Journal of Computer Vision. – 2014. – Vol. 109, № 3. – P. 252–286. – Текст : непосредственный.
10) Grewal M. S. Kalman Filtering: Theory and Practice with MATLAB / M. S. Grewal, A. P. Andrews. – 4th ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2014. – 624 p. – Текст : непосредственный.

ВКР УлГУ

11) Hartley R. Multiple View Geometry in Computer Vision / R. Hartley, A. Zisserman. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2003. – 655 p. – Текст : непосредственный.

12) Simon D. Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches / D. Simon. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2006. – 526 p. – Текст : непосредственный.

13) Stevens B. L. Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems / B. L. Stevens, F. L. Lewis, E. N. Johnson. – 3rd ed. – Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2015. – 768 p. – Текст : непосредственный.

14) Wächter A. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming / A. Wächter, L. T. Biegler // Mathematical Programming. – 2006. – Vol. 106, № 1. – P. 25–57. – Текст : непосредственный.

15) MAVSDK: Official Documentation. – URL: https://mavsdk.mavlink.io/ (дата обращения: 15.06.2026). – Текст : электронный.

16) OpenCV: Open Source Computer Vision Library. – URL: https://docs.opencv.org/ (дата обращения: 15.06.2026). – Текст : электронный.

17) PX4 Autopilot User Guide: Official Documentation. – URL: https://docs.px4.io/ (дата обращения: 15.06.2026). – Текст : электронный.

ВКР УлГТУ