УДК: 656.7 **DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-73-83**

АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ ГРАЖДАНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВО ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОЛЕТНОГО ЗАДАНИЯ

А. С. Костин
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В научной статье сопоставлены методы управления движением квадрокоптера с учетом динамических и пространственных ограничений, погрешностей локализации и задержек навигационных данных. Классические, геометрические, инкрементальные и предиктивные регуляторы рассмотрены наряду с планировщиками, фильтрами безопасности и методами обучения с подкреплением. Сравнение проведено по семи критериям с разграничением задач стабилизации, слежения за траекторией, планирования и обеспечения безопасности. Выделены механизмы компенсации неопределенности динамики и внешних возмущений, а также механизмы обработки ошибочных и запаздывающих измерений. На этой основе предложена методика сравнительного моделирования: исследуемый алгоритм заменяется при неизменном внутреннем контуре управления и системе оценивания состояния. Результаты представлены в виде качественного сопоставления методов и программы их последующей проверки.

Ключевые слова: квадрокоптер, управление движением, динамические ограничения, погрешность локализации, задержка данных, предиктивное управление, барьерная функция управления, имитационное моделирование.

Для цитирования:
Костин, А. С. Анализ методов управления беспилотным летательным аппаратом гражданского применения с учетом динамических ограничений и неопределенности во время выполнения полетного задания / А. С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 3(51). – с. 73-83. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-73-83.

ANALYSIS OF CONTROL METHODS FOR CIVIL UNMANNED AERIAL VEHICLES CONSIDERING DYNAMIC CONSTRAINTS AND UNCERTAINTY DURING FLIGHT MISSION EXECUTION

A. S. Kostin
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Quadrotor motion-control methods are compared with respect to dynamic and spatial constraints, localization errors, and navigation-data delays. Classical, geometric, incremental, and predictive controllers are examined alongside trajectory planners, safety filters, and reinforcement-learning methods. Seven comparison criteria are used, with stabilization, trajectory tracking, planning, and safety treated as distinct functions. Mechanisms for compensating model uncertainty and external disturbances are distinguished from those for handling erroneous or delayed measurements. The analysis provides a simulation methodology in which the algorithm under study is replaced while the inner control loop and state estimator remain unchanged. The results comprise a qualitative comparison and a plan for subsequent testing.

Keywords: quadrotor, motion control, dynamic constraints, localization error, data delay, model predictive control, control barrier function, simulation.

For citation:
Kostin, A. S. Analysis of control methods for civil unmanned aerial vehicles considering dynamic constraints and uncertainty during flight mission execution / A. S. Kostin // System analysis and logistics. – 2026. – № 3(51). – p. 73-83. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-73-83.

Введение

Беспилотные летательные аппараты для гражданской сферы стали играть центральную роль в автоматизации современных складов. Их популярность обусловлена способностью беспилотных систем автономно перемещаться, зависать, избегать препятствий в различных складских помещениях, ориентироваться в пространстве, точно приземляться и потенциально

работать в парке. Три наиболее перспективные области применения беспилотных систем на складах – это управление запасами, внутренняя логистика товаров, а также инспекция и наблюдение.

В области управления запасами, беспилотные системы могут использоваться для решения следующих задач: аудит запасов, управление запасами, поиск товаров, поддержание буферных запасов и инвентаризация.

Автономный полет в помещении требует одновременно решать три задачи: следовать заданной траектории, выдерживать расстояние до препятствий и соблюдать ограничения по скорости, ускорению и тяге. Их совместное выполнение зависит как от закона управления, так и от навигационной информации. Смещение оценки положения, запаздывание измерений или потеря сообщений могут ухудшить движение даже при достаточно точной модели аппарата.

В исследованиях управления беспилотными летательными аппаратами эти факторы рассматриваются в разных постановках. Геометрическое управление учитывает нелинейную кинематику при слежении за траекторией, инкрементальные методы компенсируют динамические возмущения, а предиктивные схемы с временной моделью учитывают запаздывание [1-5]. Поэтому определение метода как робастного само по себе мало помогает при выборе: необходимо уточнять вид возмущений, принятые предпосылки и границы полученных гарантий.

Практическую значимость такого выбора показывают исследования маршрутизации беспилотных транспортных систем для доставки грузов [6], мониторинга объектов в складском комплексе [7] и автоматизации складской идентификации с использованием ArUco-маркеров и RFID [8]. В этих задачах построение маршрута связано с программно-аппаратной реализацией автономного движения. Для обоснованного выбора управления важно отдельно рассмотреть ограничения самого аппарата и погрешности информации, на основании которой он движется.

Цель исследования – сопоставить методы управления движением квадрокоптера по семи критериям, существенным для полета в помещении: модели динамики, исполнительным и пространственным ограничениям, погрешности локализации, задержке данных, вычислительным затратам и способу проверки. По результатам сопоставления разрабатывается методика моделирования, в которой низкоуровневое управление сохраняется, а исследуемые алгоритмы формируют траекторию или корректируют команды.

Критерии сравнения и модель навигационных погрешностей

В структуре управления выделены три уровня (рис. 1). На первом решается задача стабилизации: обеспечиваются требуемые тяга и моменты либо формируются соответствующие команды. Второй уровень отвечает за слежение, преобразуя опорную траекторию в управляющие воздействия. Третий объединяет планирование и обеспечение безопасности с учетом препятствий и допустимой области движения. Такое разделение исключает сравнение функционально разных компонентов как взаимозаменяемых: например, планировщик FASTER не выполняет задачу PID-регулятора.

Семь критериев раскрывают разные стороны применимости метода. Модель динамики характеризуется степенью детализации и способом учета неопределенности; исполнительные ограничения – допустимыми управляющими воздействиями; пространственные – представлением препятствий и безопасной области. Остальные критерии описывают обработку погрешностей локализации, компенсацию задержки, состав вычислений и экспериментальную проверку. Вычислительные затраты сопоставляются качественно, без ранжирования времени работы на разных аппаратных платформах.



Рис. 1. Уровни управления движением квадрокоптера

Различие между возмущением динамики и погрешностью навигационных данных задается следующими соотношениями:

$$\dot{x} = f(x,u,\theta) + w;$$
$$y_k = h(x(t_k)) + b_k + \varepsilon_k;$$
$$t_k^r = t_k + \tau_k \qquad (1)$$

где x – состояние аппарата; u – управление; θ – параметры динамики; w – внешнее возмущение; f и h – модели движения и измерения; y_k – измерение, сформированное в момент t_k; b_k и ε_k – систематическая и случайная составляющие погрешности; τ_k – задержка доставки; t_k^r – момент получения сообщения.

В соотношениях (1) используется согласованная шкала времени. Пропуск означает отсутствие измерения, выброс – выход значения за принятую модель случайной ошибки. Изменение задержки от сообщения к сообщению характеризует ее вариацию, или джиттер. При моделировании каждый временной сдвиг учитывается однократно: задержку доставки нельзя повторно вводить через изменение времени самой выборки.

Далее анализируются шесть групп факторов: неопределенность модели и внешние возмущения, случайный шум, систематическое смещение, задержка и ее вариация, пропуски и выбросы. Компенсация динамического возмущения не устраняет погрешность измерения. Например, поворот системы координат карты требует согласования координатных преобразований, тогда как действие возмущающей силы компенсируется в динамическом контуре. Исполнительные и пространственные ограничения рассматриваются независимо от этих факторов.

Основные методы управления движением. Классические и геометрические регуляторы

Каскадные PID- и PD-регуляторы служат базовым вариантом управления. Допустимые воздействия обычно ограничиваются насыщением, а в PID-регуляторе дополнительно предусматривается защита интегратора. Учет препятствий и компенсация запаздывания возлагаются на внешние компоненты. Поэтому результат определяется не только настройкой регулятора, но и работой оценивателя состояния, ограничителей и канала передачи данных.

Линейно-квадратичный регулятор LQR использует локальную линейную модель и квадратичный критерий качества; жесткие пространственные ограничения в его базовую

постановку не входят. В схеме LQG он дополняется оценивателем со статистической моделью ошибок. Для обработки неизвестного смещения или неучтенной задержки эту модель необходимо расширять. PID/PD и LQR/LQG рассматриваются как типовые схемы для сопоставления; отдельные экспериментальные серии для них в выбранную литературу не включены.

Геометрическое управление описывает поступательное и вращательное движение непосредственно на пространстве состояний твердого тела. В [1] исследовано слежение на $SE(3)$, получены теоретические результаты и приведены численные примеры. Работа [9] связывает построение траекторий в постановке minimum-snap с их выполнением нелинейным регулятором. При сопоставлении этих решений важно различать ограничения, обеспеченные планировщиком, и свойства самого закона управления.

Инкрементальное управление

Инкрементальная нелинейная динамическая инверсия (INDI) использует измеренное ускорение и уменьшает зависимость компенсации возмущений от точности модели сил [2]. При этом сохраняется зависимость от качества измерения и фильтрации ускорения. Устойчивость к динамическим возмущениям, следовательно, не равнозначна устойчивости к ошибкам координат и запаздыванию обратной связи. Другие нелинейные подходы, включая backstepping и скользящие режимы, в таблицах не объединяются с INDI: выбранная литература не дает достаточной основы для их самостоятельного сопоставления.

Предиктивное управление

Линейное и нелинейное предиктивное управление (LMPC и NMPC) определяют последовательность воздействий на конечном горизонте прогноза. Ограничения по тяге, угловым скоростям и состоянию могут задаваться непосредственно в оптимизационной задаче; способ учета препятствий зависит от ее постановки. В [10] оба варианта сопоставлены на одной многороторной платформе. Эти результаты характеризуют выбранную модель, оцениватель и вычислительную среду, поэтому не задают универсального преимущества одного варианта над другим.

Предиктивные схемы различаются тем, какую неопределенность они учитывают. В [11] адаптация направлена на неизвестную полезную нагрузку, аэродинамические эффекты и внешние возмущения. В [12] при предотвращении столкновений рассматривается неопределенность состояния и моделей других аппаратов, а в [13] пространственные ограничения связываются с распределением неопределенности. Эти механизмы решают разные задачи: уточнение динамики не заменяет учета погрешности положения.

Предиктивное управление с учетом условий восприятия (PAMPC) поддерживает видимость информативных признаков, сохраняя условия для визуального оценивания [14]. Оно дополняет модель погрешности локализации, но не устраняет необходимость проверять смещение карты, потерю сопровождения, выбросы и соответствие ковариации фактической ошибке.

Для компенсации задержки требуется временная модель, например прогноз текущего состояния по запаздывающему измерению и истории команд. Такие механизмы исследованы в задачах сетевого управления и визуальной посадки [3-5]. Их применимость зависит от участка возникновения задержки: компенсация передачи команды и обработка устаревшей оценки SLAM неравнозначны, если различаются временные метки и последовательность вычислений.

Планирование, фильтры безопасности и обучение

Пространственные ограничения учитываются при построении траектории, внутри предиктивного регулятора либо при коррекции номинальной команды фильтром безопасности. Планировщики [9, 15] формируют допустимую опорную траекторию; в

FASTER дополнительно предусмотрена резервная безопасная траектория для неизвестной среды [15]. В [16] минимизируется время полета через заданные точки с учетом динамики и исполнительных ограничений. Сопоставлять такие решения следует при неизменном регуляторе слежения.

Фильтр на основе барьерной функции управления (CBF) задает условие сохранения безопасного множества и корректирует номинальную команду, решая задачу квадратичной оптимизации CBF-QP [17]. Гарантии зависят от модели динамики, сведений о состоянии, выполнимости ограничений и дискретной реализации. Погрешность локализации требует робастного или вероятностного расширения постановки.

В обучении с подкреплением управляющие воздействия формирует обученная политика. Затраты на ее применение необходимо отделять от затрат на обучение и подготовку набора ситуаций. В [18] представлены моделирование и испытания физического квадрокоптера. Они характеризуют проверенные условия, но не дают оснований автоматически распространять выводы о пространственной безопасности и устойчивости к задержке за их пределы. Для обеспечения этих свойств обученную политику целесообразно рассматривать совместно с самостоятельным защитным механизмом.

В табл. 1 и 2 представлены свойства базовых методов и решений из указанных публикаций.

Таблица 1 – Уровни управления, динамические модели и ограничения

Метод и источник	**Функция**	**Модель динамики**	**Исполнительные ограничения**	**Пространственные ограничения**
PID/PD	Стабилизация, слежение	Полная модель обычно не требуется	Насыщение; защита интегратора	Внешний планировщик или фильтр
LQR/LQG	Слежение	Линеаризация; оцениватель в LQG	В базовой задаче явно не задаются	В базовой задаче отсутствуют
Геометрическое управление [1]	Стабилизация, слежение	Нелинейная модель на SE(3)	Требуют отдельного учета	Требуют внешнего механизма
INDI [3]	Стабилизация, слежение	Инкрементальная модель; измерение ускорения	Зависят от распределения команд	Требуют внешнего механизма
LMPC/NMPC [4]	Слежение	Линейная или нелинейная	Включаются в оптимизацию	Учитываются при явном задании
Адаптивный MPC [5]	Слежение	Модель с компенсацией неопределенности	Задаются в предиктивной схеме	Одна адаптация их не обеспечивает
Вероятностный и робастный MPC [6, 13]	Планирование, безопасность	Прогноз состояния и неопределенности	Согласно принятой постановке	Вероятностные или робастные условия
PAMPC [7]	Слежение, планирование	Прогноз динамики и видимости признаков	В предиктивной задаче	Видимость признаков не заменяет безопасный коридор
MPC с задержкой [8, 9]	Слежение	Временная модель; предиктор	Согласно принятой постановке	Задаются независимо от компенсации задержки
CBF-QP [15]	Безопасность	Динамика барьерной функции	Учитываются при проверке выполнимости	Условие сохранения безопасного множества

Продолжение Таблицы 1

Метод и источник	**Функция**	**Модель динамики**	**Исполнительные ограничения**	**Пространственные ограничения**
Планировщики [2, 11, 12]	Планирование	От модели на плоских выходах до полной динамики	Задаются при построении плана	Коридор или резервная траектория в соответствующих методах
Обучение с подкреплением [14]	Стабилизация, слежение	Обученная политика	Зависят от обучения и исполнительного слоя	Требуют самостоятельного обоснования

Таблица 2 – Навигационная неопределенность, вычислительные затраты и способы проверки

Метод	**Погрешность локализации**	**Учет задержки**	**Вычисления**	**Проверка**
PID/PD	Внешняя фильтрация и оценивание	Внешний компенсатор	Фиксированный набор операций	Типовая схема, без отдельной серии
LQR/LQG	Статистическая модель в оценивателе LQG	Расширение модели	Матричные операции	Типовая схема, без отдельной серии
Геометрическое управление [1]	Отдельно от номинального закона	Отдельный механизм	Явный закон управления	Теория и численные примеры [1]
INDI [3]	Компенсация возмущений не заменяет модель ошибки координат	Отдельный механизм	Измерения, фильтры, инверсия	Эксперименты авторов [3]
LMPC/NMPC [4]	Требуется явная модель ошибки	Временное расширение	Квадратичная или нелинейная оптимизация	Сопоставление на общей платформе [4]
Адаптивный MPC [5]	Адаптация не устраняет смещение оценки SLAM	Отдельный механизм	MPC и адаптация	Физические эксперименты [5]
Вероятностный и робастный MPC [6, 13]	Явная модель неопределенности состояния	Требуется специальный учет	Прогноз неопределенности	Моделирование и физические испытания [13]
PAMPC [7]	Поддержание условий наблюдения	Отдельный механизм	NMPC и критерии восприятия	Эксперименты с бортовым оцениванием [7]
MPC с задержкой [8, 9]	Зависит от оценивателя	Явная компенсация в выбранном канале	MPC и предсказание	Физические эксперименты [8, 9]
CBF-QP [15]	Робастное или вероятностное расширение	Отдельное обоснование	Квадратичная оптимизация	Теория; автомобильные примеры [15]
Планировщики [2, 11, 12]	Модель карты и запаса расстояния	Не заменяют временную модель регулятора	Оптимизация, перепланирование	Эксперименты в разных условиях [2, 11, 12]
Обучение с подкреплением [14]	В пределах условий обучения и проверки	При включении в обучение или архитектуру	Применение политики; обучение отдельно	Моделирование и физическая платформа [14]

Прямое ранжирование по времени вычисления из разных публикаций некорректно. Этот показатель зависит от процессора, числа потоков, частоты управления, горизонта прогноза, числа препятствий, решателя и критерия его остановки. В сравнительном эксперименте перечисленные условия фиксируются, после чего измеряются среднее время, максимум и доля превышений срока расчета команды.

Временные характеристики контура включают три разные величины: длительность вычисления команды, возраст входной оценки состояния и задержку применения управления. Малое время расчета не компенсирует устаревшие входные данные. Кроме того, редкие задержки могут нарушать работу контура при благоприятном среднем значении. Зарегистрированный максимум характеризует только проведенную серию и не служит доказанной верхней границей времени выполнения.

Способ проверки определяет границы выводов. Моделирование позволяет сопоставлять оценку с эталонным состоянием; программные и аппаратные испытания в контуре моделирования дополнительно проверяют интерфейсы и вычислительные задержки. Физический эксперимент показывает работу реального аппарата в выбранных условиях. На каждом этапе наряду с ошибкой слежения следует регистрировать нарушения ограничений, возраст данных, долю несвоевременных команд и разброс между независимыми повторами.

Формирование контура моделирования событий в имитационной среде

Предлагается заменять алгоритм только на одном исследуемом уровне, сохраняя сенсоры, оцениватель состояния и внутренний контур PX4. Базовый вариант – штатное управление по траектории. С ним сравниваются предиктивная коррекция с явными ограничениями и тот же номинальный регулятор с независимым фильтром безопасности. Такая схема позволяет оценивать влияние планирования и коррекции команд отдельно от качества стабилизации.

Программа будущих испытаний включает задержки 0, 50, 100 и 200 мс, несколько уровней позиционного шума, постоянное смещение, пропуски и выбросы (табл. 3). Сначала каждый фактор изменяется раздельно, затем исследуется заранее заданное сочетание воздействий. Эти серии образуют план проверки, а не результаты выполненного сравнения.

Таблица 3 – План сравнительных испытаний при навигационных искажениях

Серия	**Условия**	**Предмет проверки**	**Основные показатели**
Базовая	Без искусственных искажений	Работа в номинальных условиях	Ошибка слежения, время, нарушения ограничений
Задержка	0, 50, 100 и 200 мс	Компенсация устаревания данных	p95 и максимум ошибки; задержка; сроки расчета
Случайная погрешность	Несколько заранее заданных уровней σ	Чувствительность к шуму и его ковариации	RMSE, p95, минимальное расстояние до препятствия
Смещение	Раздельные воздействия на положение и ориентацию	Согласование карты и установившаяся ошибка	Компоненты ошибки, нарушения ограничений
Пропуски и выбросы	Одиночные и пакетные воздействия	Переход к удержанию и восстановление	Время восстановления, переходы к удержанию (HOLD)
Сочетание	Фиксированное сочетание воздействий	Работоспособность выбранной реализации	Завершение маршрута, нарушения, затраты ресурсов, разброс

Критерии успешного прохождения маршрута устанавливаются до начала серии: завершение без столкновения, соблюдение принятых допусков по динамическим ограничениям и отсутствие неограниченного роста задержки. Число повторов выбирается с

учетом изменчивости результатов и требуемой точности оценивания. Несколько запусков, в том числе три повтора, достаточны лишь для первоначального описательного сравнения, но не для обоснования малой вероятности отказа.

Погрешность локализации и ошибка слежения оцениваются раздельно. Абсолютная и относительная ошибки траектории (ATE и RPE) характеризуют расхождение оцененного и эталонного движения, а ошибка слежения – заданного и фактического. Апостериорное совмещение траекторий может компенсировать ошибку привязки к карте. Поэтому безопасность движения оценивается также в фиксированной системе координат препятствий, без подмены этой оценки метриками после совмещения.

Применение методики к имитационному среде

На имитационном среде Gazebo, квадрокоптер «Буран» PX4 предлагается сохранить как внутренний контур управления, а исследуемые методы реализовать на внешнем уровне. Эталонное состояние Gazebo используется только для вычисления показателей качества. До начала сравнения по конфигурации и журналам запуска проверяются изоляция эталона от управления, сохранение исходных временных меток и наличие единственного источника внешней одометрии PX4.

Для решения задачи автономной навигации и идентификации объектов, формируется программный код, состоящий из нескольких блоков: блока автономной навигации при помощи Aruco-маркеров по заданным координатам, блока идентификации объектов машинным зрением и блока программного кода для работы с модулем RFID.

Для осуществления автономного полета при помощи Aruco-маркеров по заданным координатам, применяется функция navigate_wait [5, 15]. Данная функция позволяет осуществить полет по заданным координатам с указанной погрешностью (tolerance), где tolerance = 0.2 – погрешность позиционирования в 0.2 метра. При помощи цикла while происходит проверка текущих координат через frame id ‘navigate_target’, где navigate_target – координаты точки, в которую сейчас нужно переместиться. Как только текущие координаты позиции беспилотной системы становятся меньше заданной погрешности, значит были достигнуты заданные координаты.

Трехмерная и двумерная карты на рис. 2 и 3 иллюстрируют рабочее пространство стенда и представление траектории в RTAB-Map. Количественная оценка расстояний до препятствий должна опираться на исходную карту, модель аппарата и параметры измерительного канала; по одним изображениям ее выполнить нельзя.

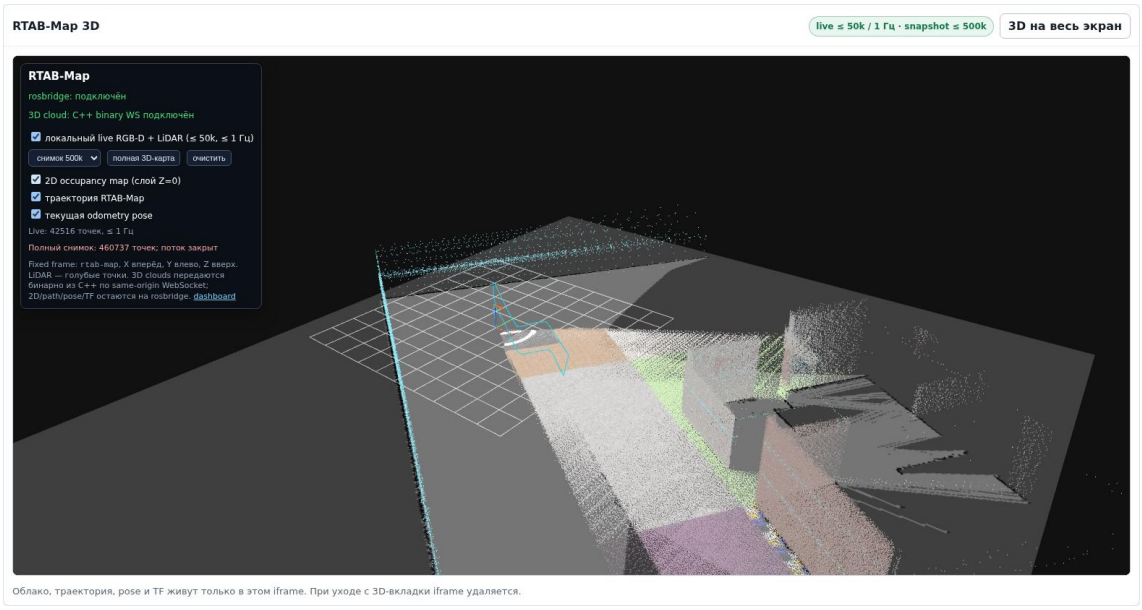


Рис. 2. Трехмерная карта и траектория RTAB-Map в имитационной среде Gazebo

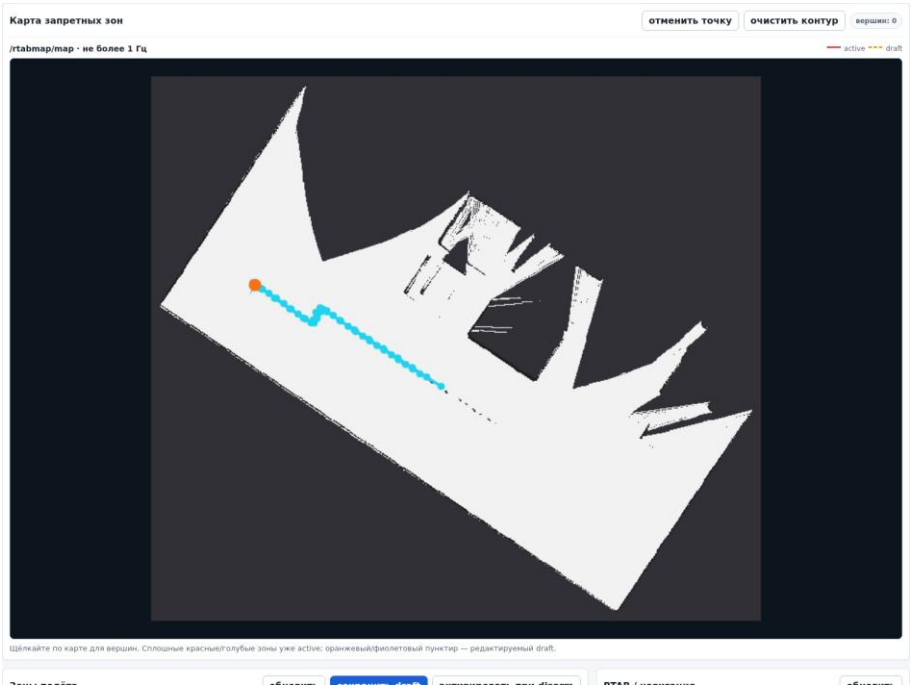


Рис. 3. Двумерное представление карты и траектории в имитационной среде Gazebo

Выбор метода определяется прежде всего задачей, которую ему предстоит решать. Предиктивная схема позволяет явно ограничивать управляющие воздействия; планировщик или фильтр безопасности учитывает препятствия. Если положение известно с существенной погрешностью, соответствующий компонент должен учитывать ошибку состояния, а не только динамические возмущения. Усложнение архитектуры само по себе не гарантирует уменьшения ошибки: результат зависит от согласования компонентов и их настройки.

Применимость вероятностных ограничений [13] и робастного прогноза [12] зависит от соответствия принятой модели неопределенности реальным погрешностям. Выбросы, переинициализация карты и потеря сообщений требуют самостоятельных испытаний. Аналогично, компенсация задержки начинается с определения ее источника – измерительного канала, оценивателя, вычисления команды или передачи управления. С учетом этого участка и доступной истории команд выбирается предиктор [3, 4].

Следующий этап – реализация предложенной программы моделирования и проверка конкретных алгоритмов. Переход к аппаратным и летным испытаниям потребует отдельно установить соответствие модели реальному квадрокоптеру и определить условия эксперимента.

Заключение

Сопоставление критериям позволило связать методы управления квадрокоптером с выполняемыми функциями: стабилизацией, слежением, планированием и обеспечением безопасности. Главное различие проходит между компенсацией неопределенности динамики и обработкой погрешностей навигационной информации. Учет внешних сил, ограничение команды и компенсация запаздывающего измерения требуют разных механизмов; свойства одного из них нельзя переносить на весь контур управления.

Также была разработана методика сравнительного моделирования с неизменными внутренним контуром и оценивателем состояния. Она предусматривает раздельное внесение навигационных искажений, контроль временных меток, единые метрики и независимые повторы. Полученный результат – качественное сопоставление методов и программа их проверки на имитационном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lee T.* Geometric tracking control of a quadrotor UAV on SE(3) / T. Lee, M. Leok, N. H. McClamroch // Proc. 49th IEEE CDC. – 2010. – P. 5420–5425. DOI: 10.1109/CDC.2010.5717652.
2. *Smeur E. J. J.* Cascaded incremental nonlinear dynamic inversion for MAV disturbance rejection / E. J. J. Smeur, G. C. H. E. de Croon, Q. Chu // Control Engineering Practice. – 2018. – Vol. 73. – P. 79–90. – DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.01.003.
3. *Jang D.* Networked operation of a UAV using Gaussian process-based delay compensation and model predictive control / D. Jang [et al.] // Proc. IEEE ICRA. – 2019. – P. 9216–9222. – DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793472.
4. *Carlos B. B.* An efficient real-time NMPC for quadrotor position control under communication time-delay / B. B. Carlos [et al.] // Proc. ICARCV. – 2020. – P. 982–989. DOI: 10.1109/ICARCV50220.2020.9305513.
5. *Guo Z.* Robust visual landing control of quadrotor on a moving platform: a sampled-data approach with delayed output and disturbances / Z. Guo [et al.] // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2024. – P. 2283-2297. DOI: 10.1109/TCST.2024.3430130.
6. *Костин А. С.* Исследование моделей и методов маршрутизации и практического выполнения автономного движения беспилотными транспортными системами для доставки грузов / А. С. Костин, Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2023. – Т. 15, № 3. – С. 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-524-536.
7. *Костин А. С.* Разработка программно-аппаратного обеспечения беспилотной системы для решения задачи мониторинга движения объектов в складском комплексе / А. С. Костин, В. В. Рубинов, Н. Н. Майоров // Датчики и системы. – 2024. – № 4. – С. 44–50. DOI: 10.25728/datsys.2024.4.8.
8. *Костин А. С.* Разработка программно-аппаратного комплекса для решения задачи автоматизации процесса идентификации объектов на складе при помощи беспилотных систем / А. С. Костин // Датчики и системы. – 2025. – № 4. – С. 43–48. DOI: 10.24412/1992-7185-2025-4-43-48.
9. *Mellinger D.* Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors / D. Mellinger, V. Kumar // Proc. IEEE ICRA. – 2011. – P. 2520–2525. DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980409.
10. *Kamel M.* Linear vs nonlinear MPC for trajectory tracking applied to rotary wing micro aerial vehicles / M. Kamel, M. Burri, R. Siegwart // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, № 1. – P. 3463–3469. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.849.
11. *Hanover D.* Performance, precision, and payloads: adaptive nonlinear MPC for quadrotors / D. Hanover [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2022. – Vol. 7, № 2. – P. 690–697. DOI: 10.1109/LRA.2021.3131690.
12. *Kamel M.* Robust collision avoidance for multiple micro aerial vehicles using nonlinear model predictive control / M. Kamel [et al.] // Proc. IEEE/RSJ IROS. – 2017. – P. 236–243. DOI: 10.1109/IROS.2017.8202163.
13. *Zhu H.* Chance-constrained collision avoidance for MAVs in dynamic environments / H. Zhu, J. Alonso-Mora // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2019. – Vol. 4, № 2. – P. 776–783. DOI: 10.1109/LRA.2019.2893494.
14. *Falanga D.* PAMPC: perception-aware model predictive control for quadrotors / D. Falanga [et al.] // Proc. IEEE/RSJ IROS. – 2018. – P. 5200–5207. – DOI: 10.1109/IROS.2018.8593739.
15. *Tordesillas J.* FASTER: fast and safe trajectory planner for navigation in unknown environments / J. Tordesillas [et al.] // IEEE Transactions on Robotics. – 2022. – Vol. 38, № 2. – P. 922–938. DOI: 10.1109/TRO.2021.3100142.
16. *Foehn P.* Time-optimal planning for quadrotor waypoint flight / P. Foehn, A. Romero, D.



Scaramuzza // Science Robotics. – 2021. – Vol. 6, № 56. – 49 p. DOI: 10.1126/scirobotics.abh1221.
17. *Ames A. D.* Control barrier function based quadratic programs for safety critical systems / A. D. Ames, X. Xu, J. W. Grizzle, P. Tabuada // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2017. – Vol. 62, № 8. – P. 3861–3876. DOI: 10.1109/TAC.2016.2638961.
18. *Hwangbo J.* Control of a quadrotor with reinforcement learning / J. Hwangbo [et al.] // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2017. – Vol. 2, № 4. – P. 2096–2103. DOI: 10.1109/LRA.2017.2720851.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Костин Антон Сергеевич
Канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: anton13258@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kostin Anton Sergeevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of System Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: anton13258@mail.ru

Дата поступления: 15.09.2026
Дата принятия: 15.09.2026