Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

РЫБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.А. СОЛОВЬЕВА

Институт Информационные технологии и системы управления

Кафедра математического и программного обеспечения электронных вычислительных средств

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

по дисциплине

«Разработка информационно-управляющих систем»

на тему:

«Прогнозирование траектории движения объектов»

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

Студент группы ПИМ-24 Ананьев Г.Е.

Руководитель к.т.н., доцент Ломанов А.Н.

Рыбинск 2025

Оглавление

[Глава 1. Анализ технического задания 3](#_Toc199610962)

[1.1. Сущность задачи 3](#_Toc199610963)

[1.2. Цель разработки (Бизнес-цель) 4](#_Toc199610964)

[1.3. Целевая аудитория (Пользователи системы) 5](#_Toc199610965)

[1.4. Ключевые функции (Основные варианты использования) 5](#_Toc199610966)

[Глава 2. Заинтересованные стороны 7](#_Toc199610967)

[2.1. Классификация и описание заинтересованных сторон 7](#_Toc199610968)

[2.2. Уровень влияния заинтересованных сторон на проект 10](#_Toc199610969)

[3. Определение границ системы 11](#_Toc199610970)

[3.1. Границы модуля ПТДО 11](#_Toc199610971)

[3.2. Взаимодействие с внешними системами 12](#_Toc199610972)

[3.3. Ограничения 13](#_Toc199610973)

[4. User Stories/Use cases 13](#_Toc199610974)

[4.1. User stories 13](#_Toc199610975)

[4.2. Use cases 14](#_Toc199610976)

[5.Функциональные требования 16](#_Toc199610977)

[Заключение 20](#_Toc199610978)

# Глава 1. Анализ технического задания

## 1.1. Сущность задачи

Прогнозирование траектории движения объектов (ПТДО) представляет собой сложную вычислительную задачу, заключающуюся в предсказании будущих положений и состояний (координат, скорости, ускорения) динамических объектов в пространстве на основе анализа их текущего и исторического движения, а также контекста окружающей среды. Объектами могут выступать транспортные средства (автомобили, дроны), роботы, пешеходы, спортивные снаряды, космические аппараты. Ключевая сложность задачи обусловлена:

* Высокой динамичностью и неопределенностью среды. Поведение объектов (особенно агентов) может быть непредсказуемым, изменяться под влиянием внешних факторов и взаимодействий.
* Наличием шумов и погрешностей. Данные от сенсоров (камеры, лидары, радары, GPS/ГЛОНАСС) неизбежно содержат шумы и ошибки измерения.
* Мультимодальностью возможных сценариев. В ряде сценариев (например, движение пешехода на перекрестке) существует несколько равновероятных будущих траекторий.
* Жесткими временными ограничениями. Во многих приложениях (автономное вождение, управление дроном) прогноз должен быть сгенерирован за доли секунды.
* Необходимостью учета взаимодействий. Траектория одного объекта часто зависит от поведения других объектов в среде (мультиагентные системы).

Ключевые процессы

* Сбор данных: использование датчиков (лидары, камеры, GPS, радары), потоков видео или предобработанных наборов данных.
* Предобработка: фильтрация шумов, нормализация, выделение признаков.
* Моделирование: применение алгоритмов (физические модели, машинное обучение) для прогнозирования.
* Верификация: проверка точности прогноза и корректировка параметров модели.

## 1.2. Цель разработки (Бизнес-цель)

Разработка программного модуля прогнозирования траекторий движения объектов направлена на достижение следующих стратегических бизнес-целей:

* Повышение безопасности. Снижение количества аварийных ситуаций и происшествий в таких областях, как автономные транспортные средства, роботизированные склады, управление движением БПЛА, за счет заблаговременного предсказания опасных маневров или столкновений.
* Оптимизация процессов. Улучшение эффективности логистики, навигации роботов, управления потоками людей/транспорта за счет более точного прогнозирования перемещений и планирования оптимальных маршрутов.
* Снижение эксплуатационных затрат. Минимизация рисков повреждения оборудования и снижение затрат на страхование за счет повышения надежности систем.
* Обеспечение конкурентного преимущества. Создание интеллектуальных систем (автономные решения, системы видеонаблюдения, симуляторы), превосходящих аналоги по точности и надежности прогноза.
* Расширение функциональных возможностей. Включение продвинутых функций прогнозирования в новые или существующие программно-аппаратные комплексы.

## 1.3. Целевая аудитория (Пользователи системы)

Разрабатываемый модуль ПТДО является компонентом более крупных систем. Его основными пользователями являются:

* Операторы и пассажиры автономных транспортных средств. Безопасность и комфорт перемещения зависят от точности прогноза окружающих объектов.
* Персонал логистических центров и складов. Эффективное управление потоками роботов-погрузчиков.
* Операторы систем видеонаблюдения и безопасности. Своевременное обнаружение подозрительного поведения или потенциально опасных ситуаций по траекториям движения.
* Разработчики компьютерных игр и симуляторов. Создание реалистичного поведения персонажей (NPC) и объектов в играх и дополненной и виртуальной реальностях AR/VR.
* Специалисты по управлению воздушным движением/ Мониторинг и прогнозирование траекторий беспилотных летательных аппаратов.
* Инженеры-разработчики/ Специалисты, интегрирующие модуль ПТДО в целевую систему.

## 1.4. Ключевые функции (Основные варианты использования)

Модуль прогнозирования траекторий должен реализовывать следующие ключевые функции (основные варианты использования):

* Прием и предобработка входных данных: получение данных о текущих и исторических положениях/состояниях целевых объектов (координаты, скорость, ускорение, ориентация) от сенсоров или других подсистем; получение данных об окружающей среде (статическая карта, динамические препятствия, зоны ограничений); фильтрация шумов, ассоциация измерений с объектами (трекинг), интерполяция/экстраполяция данных.
* Прогнозирование траекторий: генерация прогноза будущих положений и состояний каждого отслеживаемого объекта на заданный временной горизонт (например, 3-5 секунд); поддержка прогнозирования как одиночных объектов, так и объектов во взаимодействии (мультиагентные сценарии); возможность генерации множества вероятных траекторий (мультимодальный прогноз) для сценариев с высокой неопределенностью.
* Оценка неопределенности прогноза: предоставление метрик, характеризующих уверенность системы в сгенерированном прогнозе (например, ковариационные матрицы, доверительные интервалы).
* Предоставление результатов прогноза: вывод прогнозируемых траекторий (последовательность точек/состояний) и оценок неопределенности в формате, понятном потребителям (другим подсистемам).
* Конфигурирование и калибровка: возможность настройки параметров алгоритмов прогнозирования (тип модели, горизонт прогноза) под конкретную целевую платформу и сценарий использования; предоставление интерфейсов (API, конфигурационные файлы) для настройки.

1.5. Ключевые нефункциональные требования (Основные качества системы)

Модуль ПТДО должен обладать следующими ключевыми нефункциональными качествами:

* Точность: cредняя ошибка прогноза не должна превышать 0.3 м для горизонта прогноза 1 сек; требования к точности могут не выполняться не более чем в 10% сценариев.
* Производительность (Скорость работы): время генерации прогноза (латентность) должно быть не более 200 мс на один объект.
* Надежность и Отказоустойчивость: модуль должен корректно обрабатывать частичную потерю данных с сенсоров, временные пропуски треков; должна быть предусмотрена обработка ошибок и возврат в стабильное состояние при возникновении исключительных ситуаций.
* Ресурсоемкость: потребление оперативной памяти (RAM) не должно превышать 512 МБ; загрузка целевого процессора (CPU) не должна превышать 50%; энергопотребление должно быть минимизировано для мобильных систем.
* Адаптивность: модуль должен сохранять работоспособность и приемлемую точность при умеренном уровне шумов в входных данных; модуль должен адаптировать прогноз при резких изменениях траектории объекта.
* Интегрируемость: модуль должен предоставлять четко определенные программные интерфейсы (API) для взаимодействия с другими компонентами системы; модуль должен поддерживать стандартные форматы входных/выходных данных.

# Глава 2. Заинтересованные стороны

## 2.1. Классификация и описание заинтересованных сторон

Заинтересованные стороны (Stakeholders) — это физические или юридические лица, группы или организации, чьи интересы могут быть затронуты созданием, эксплуатацией или выводом из эксплуатации программного модуля прогнозирования траекторий движения объектов (ПТДО). Идентификация и анализ их потребностей критичны для успешной реализации проекта.

Описание и классификация заинтересованных сторон представлена в таблице Таблица 1 - Описание заинтересованных сторон.

Таблица 1 - Описание заинтересованных сторон

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Категория | Стейкхолдер | Роль и интересы | Влияние на систему |
| Конечные бенефициары | Операторы/пассажиры АТС | Безопасность перемещения, комфорт | Требуют максимальной точности и надежности прогноза |
|  | Персонал логистических центров | Эффективность управления роботами, минимизация простоев | Заинтересованы в производительности и адаптивности |
|  | Операторы систем безопасности | Своевременное выявление угроз на основе аномальных траекторий | Требуют высокой точности и поддержки мультиагентных сценариев |
|  | Разработчики игр/симуляторов, виртуальной и дополненной реальностей | Реалистичность поведения NPC и объектов | Нуждаются в вариативности прогноза и низкой ресурсоемкости |
| Прямые пользователи | Инженеры-интеграторы | Встраивание модуля в целевую систему | Требуют четкого API, документирования, соответствия стандартам |
|  | Системные аналитики | Настройка параметров алгоритма под конкретные сценарии | Заинтересованы в возможности конфигурации |
|  | Тестировщики | Валидация точности и надежности модуля | Требуют инструментов логирования и доступа к тестовым датасетам |
| Разработчики | Программисты ML/Computer Vision | Реализация и оптимизация алгоритмов прогнозирования | Заинтересованы в выборе технологий, качестве кода, возможности рефакторинга |
|  | Архитекторы ПО | Проектирование структуры модуля, интеграция с другими компонентами | Требуют модульности, масштабируемости |
| Руководство и инвесторы | Менеджеры продукта | Соответствие модуля бизнес-целям, соблюдение сроков и бюджета | Контролируют выполнение функциональных и нефункциональных требований, оценивают риски |
|  | Инвесторы | Рентабельность разработки, рыночная конкурентоспособность решения | Требуют обоснования выбора методов, анализа ROI |
| Регуляторы и стандартизирующие органы | Сертификационные центры | Соответствие стандартам безопасности | Диктуют требования к надежности и к безопасности |
|  | Государственные органы | Соответствие законам о персональных данных | Требуют анонимизацию данных и шифрование |
| Эксплуатационный персонал | Технические специалисты | Обновление и поддержка модуля в промышленной среде | Заинтересованы в мониторинге, удобстве эксплуатации и обслуживания |
| Косвенные участники | Поставщики датчиков | Совместимость данных с другим оборудованием | Влияют на требования к формату входных данных |
|  | Конкуренты | Анализ рыночных аналогов для улучшения продукта | Косвенно формируют требования к точности функциональности |

## 2.2. Уровень влияния заинтересованных сторон на проект

Высокое влияние:

* Инвесторы.
* Регуляторы.
* Менеджеры продукта.

Среднее влияние:

* Инженеры-интеграторы.
* Архитекторы ПО.
* Сертификационные центры.

Низкое влияние:

* Операторы АТС.
* Персонал складов.
* Разработчики игр, симуляторов, виртуальной и дополненной реальностей.

# 3. Определение границ системы

## 3.1. Границы модуля ПТДО

Описание границ модуля приведено в таблице Таблица 2 - Границы модуля ПТДО.

Таблица 2 - Границы модуля ПТДО

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Аспект | Входит в границы модуля | Находится за границами модуля |
| Функциональность | Прием и предобработка входных данных | Физический сбор данных |
| Прогнозирование траекторий движения объектов | Объединение данных от разных источников |
| Оценка неопределенности прогноза | Принятие решений на основе прогноза |
| Формирование выходного формата данных | Планирование траектории |
| Конфигурирование параметров | Управление исполнительными механизмами |
| Данные | Текущие/исторические координаты, скорости, ускорения объектов | "Сырые" данные сенсоров |
| Высокоуровневые команды управления |
| Пользовательские интерфейсы (UI) |
| Алгоритмы | Модели прогнозирования (LSTM, фильтры, гибридные) | Алгоритмы ассоциация измерений с объектами (трекинг) |
| Алгоритмы фильтрации шумов | Построение карты в реальном времени |
| Алгоритмы планирования пути |
| Аппаратная платформа | Оптимизация под вычислительные ограничения конкретной ЭВМ | Управление конкретными сенсорами (драйверы камер, LiDAR) |
| Прямой контроль над двигателями/рулевым управлением |
| Эксплуатация | Логирование работы модуля | Системы мониторинга состояния всей платформы |
| API для интеграции | Механизмы обновления прошивок внешних устройств |

## 3.2. Взаимодействие с внешними системами

1. Подсистема трекинга:
   1. Роль: Предоставляет ассоциированные данные.
   2. Граница: Модуль ПТДО не занимается ассоциацией сенсорных измерений.
2. Планировщик траектории:
   1. Роль: Использует прогноз для построения безопасного пути.
   2. Граница: Модуль ПТДО не принимает решений об избегании препятствий.
3. Сенсорные подсистемы (LiDAR, камеры, радары):
   1. Роль: Источники «сырых» данных.
   2. Граница: Взаимодействие только через промежуточный слой.

## 3.3. Ограничения

* Модуль требует наличия предварительно ассоциированных треков объектов.
* Прогноз корректен только при стабильном поступлении входных данных.
* Не поддерживает прогнозирование для объектов, появившихся недавно (менее 100 мс назад).

# 4. User Stories/Use cases

## 4.1. User stories

Пользовательские истории, которые помогают команде разработки понять нужду клиента описаны в таблице Таблица 3 - User stories.

Таблица 3 - User stories

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № | Формулировка | Приоритет |
| 1 | Как инженер-интегратор, я хочу настраивать параметры модели через конфигурационный файл, чтобы адаптировать прогнозирование под платформу (дрон/автомобиль). | Высокий |
| 2 | Как разработчик системы планирования траектории, я хочу получать прогнозы с оценкой неопределённости, чтобы строить безопасный маршрут робота. | Критичный |
| 3 | Как оператор автономного ТС, я хочу точный прогноз траекторий пешеходов (≤ 0.3 м), чтобы предотвратить аварии. | Высокий |
| 4 | Как аналитик безопасности, я хочу обработку данных в реальном времени при шумах, чтобы выявлять аномалии. | Средний |
| 5 | Как разработчик игр, я хочу получать множественные варианты траекторий NPC, чтобы создавать реалистичное поведение. | Низкий |
| 6 | Как тестировщик, я хочу логировать промежуточные результаты прогноза, чтобы валидировать точность модели. | Средний |

## 4.2. Use cases

1. **Прогнозирование траектории объекта**
   1. **Назначение:** Генерация прогноза движения целевого объекта.
   2. **Участники:**
      1. Основной: Система планирования траектории (внешний актор).
      2. Вспомогательный: Подсистема трекинга.
   3. **Предусловия:**
      1. Модуль ПТДО инициализирован.
      2. Подсистема трекинга предоставляет актуальные данные.
   4. **Основной поток:**
      1. Подсистема трекинга отправляет историю состояний объекта (координаты, скорость).
      2. Модуль ПТДО предобрабатывает данные (фильтрация шумов).
      3. Модуль применяет выбранную модель прогнозирования.
      4. Модуль оценивает неопределённость прогноза.
      5. Модуль возвращает прогнозируемую траекторию в выходном формате.
   5. **Постусловия:** Прогноз доступен системе планирования.
   6. **Альтернативные потоки:**
      1. Объект исчезает из поля зрения*:*
         1. Модуль экстраполирует траекторию на основе последних данных.
         2. Увеличивает показатель неопределённости на 50%.
2. **Конфигурация параметров прогнозирования**
   1. **Назначение:** Настройка алгоритмов под целевую платформу.
   2. **Участники:** Инженер-интегратор.
   3. **Предусловия:** Доступ к API конфигурации.
   4. **Основной поток:**
      1. Инженер отправляет запрос на получение текущих параметров.
      2. Модуль возвращает конфигурационный файл.
      3. Инженер изменяет параметры (горизонт прогноза, тип модели).
      4. Модуль валидирует новые параметры.
      5. Модуль применяет конфигурацию без перезапуска.
   5. **Постусловия:** Параметры сохранены в персистентном хранилище.
   6. **Альтернативные потоки:**
      1. Некорректные параметры*:*
         1. Модуль возвращает ошибку по итогам валидации параметров.
         2. Инженер корректирует значения.
3. **Обработка резкого изменения траектории**
   1. **Назначение:** Адаптация прогноза при неожиданном манёвре.
   2. **Участники:** Система сенсорного слияния.
   3. **Предусловия:** Объект движется предсказуемо.
   4. **Основной поток:**
      1. Сенсоры фиксируют резкое изменение состояния.
      2. Модуль ПТДО переключается на экстренную модель прогноза.
      3. Модуль генерирует обновлённую траекторию за ≤ 200 мс.
      4. Оценка неопределённости повышается до 0.9.
   5. **Постусловия:** Система планирования получает высокоприоритетный прогноз.

# 5.Функциональные требования

Функциональные требования к модулю прогнозирования траектории движения объектов представлены в таблицах: Таблица 4 - Требования к обработке входных данных, Таблица 5 - Требования к прогнозированию траекторий, Таблица 6 - Требования к оценке неопределённости, Таблица 7 - Требования к выходным данным, Таблица 8 - Требования к конфигурации модуля.

Таблица 4 - Требования к обработке входных данных

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Описание | Критерии приемки | Приоритет |
| 1 | Модуль должен принимать данные о текущих и исторических состояниях объектов (ID, координаты, скорость, ускорение, ориентация) | Поддержка форматов: JSON, Protobuf, ROS-сообщения. Задержка ≤ 50 мс | Критический |
| 2 | Система должна фильтровать шумы во входных данных с помощью цифровых фильтров (медианный, Калмана) | Снижение MSE на 30% при искусственном шуме | Высокий |
| 3 | Модуль должен ассоциировать входящие данные с существующими треками объектов | Точность ассоциации ≥ 98% для объектов в зоне видимости ≥ 2 сек | Критический |
| 4 | Система должна обрабатывать статические карты среды | Поддержка форматов: PNG, GeoTIFF, OpenDRIVE. Разрешение ≥ 0.1 м/пиксель | Средний |

Таблица 5 - Требования к прогнозированию траекторий

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Описание | Критерии приемки | Приоритет |
| 1 | Модуль должен генерировать прогноз на фиксированный временной горизонт (конфигурируемый) | Диапазон: 1-10 сек. Шаг дискретизации: 0.1 сек | Критический |
| 2 | Система должна поддерживать несколько режимов прогнозирования | Переключение за ≤ 500 мс. Точность ADE ≤ 0.5 м для каждого режима | Высокий |
| 3 | Для сцен с высокой неопределенностью модуль должен генерировать ≥ 2 варианта траекторий | Каждый вариант с коэффициентом уверенности > 0.2 | Средний |
| 4 | При резком изменении траектории объекта система должна активировать экстренный режим прогноза | Время реакции ≤ 200 мс | Критический |

Таблица 6 - Требования к оценке неопределённости

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Описание | Критерии приемки | Приоритет |
| 1 | Для каждой прогнозируемой точки модуль должен рассчитывать ковариационную матрицу | Размерность матрицы: 2x2 (x,y). Диапазон значений: [0.01, 1.0] | Высокий |
| 2 | Система должна вычислять общий confidence score для траектории (0.0–1.0) | Корреляция с фактической ошибкой: R² ≥ 0.85 | Средний |
| 3 | При пропуске входных данных модуль должен увеличивать неопределенность прогноза | Коэффициент роста неопределенности: 1.5x за каждые 100 мс пропуска | Высокий |

Таблица 7 - Требования к выходным данным

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Описание | Критерии приемки | Приоритет |
| 1 | Модуль должен возвращать прогнозы в формате JSON с указанием ID объекта | Структура соответствует требованиям | Критический |
| 2 | Система должна поддерживать вывод данных через ROS-топики и REST API | Задержка вывода ≤ 100 мс. Пропускная способность ≥ 5 объектов/сек | Высокий |
| 3 | Для мультимодальных прогнозов модуль должен ранжировать траектории по убыванию confidence | Сортировка прогнозов в выходных данных по убыванию коэффициента уверенности | Средний |

Таблица 8 - Требования к конфигурации модуля

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| № | Описание | Критерии приемки | Приоритет |
| 1 | Модуль должен позволять настраивать параметры через YAML-файл | Поддерживаемые параметры: горизонт прогноза, модель, веса фильтра, точность прогноза, лимит времени на прогноз. | Высокий |
| 2 | Система должна валидировать входные параметры конфигурации | Выдача ошибки при выходе за диапазон допустимых значений, продолжение работы по исходной конфигурации | Критический |
| 3 | Применение новой конфигурации должно происходить без перезапуска модуля | Время применения ≤ 500 мс. Без потери данных в процессе. | Высокий |

# Заключение

1. Научно-технические результаты:
   1. Проведен системный анализ предметной области, выявлены критические проблемы: неопределённость среды, вычислительные ограничения, недостаток данных.
   2. Разработана архитектура модуля ПТДО с четкими границами ответственности и стандартизированными интерфейсами (вход/выход, конфигурация, мониторинг).
   3. Сформулированы функциональные и нефункциональные требования, включая: точность прогноза, требования к работе в реальном времени, поддержку мультимодальных сценариев.
2. Практическая значимость:
   1. Архитектурные решения (разделение трекинга, прогнозирования и планирования) обеспечивают гибкость интеграции модуля в различные системы.
3. Перспективы дальнейших исследований:
   1. Легковесные архитектуры: адаптация трансформерных моделей для устройств с ограниченными ресурсами (квантование, дистилляция).
   2. Генеративные модели: использование Diffusion-моделей для генерации физически корректных траекторий в условиях неопределенности.
   3. Мультиагентное взаимодействие: внедрение графовых сетей для прогнозирования в сверхплотных средах (города с плотной застройкой, логистические хабы).

Разработанная спецификация модуля ПТДО служит основой для создания конкурентоспособных решений в области автономных систем. Достижение целевых показателей позволит: снизить аварийность автономного транспорта; повысить КПД роботизированных складов через оптимизацию маршрутов; обеспечить технологический суверенитет в сфере AI-навигации, соответствующей международным стандартам безопасности.

Настоящая работа подтверждает, что эффективное прогнозирование траекторий требует не только совершенства алгоритмов, но и системного подхода к проектированию, учитывающего ограничения среды и требования пользователей. Результаты исследования открывают пути для дальнейшей научной и инженерной деятельности в этой динамично развивающейся области.