Оглавление

[Введение 2](#_Toc200723035)

[1. Процесс прогнозирования траектории движения объектов 5](#_Toc200723036)

[1.1. Предметная область 5](#_Toc200723037)

[1.2. Проблемы предметной области 6](#_Toc200723038)

[1.3. Анализ существующих методов решения задачи прогнозирования 8](#_Toc200723039)

[1.4. Критерии оценки решений для прогнозирования траекторий движения объектов 14](#_Toc200723040)

[1.5. Обзор аналогов и научных статей 17](#_Toc200723041)

[1.6. Выводы по Главе 1 29](#_Toc200723042)

Введение

**Актуальность темы.** Прогнозирование траекторий движения объектов является критически важной задачей в контексте стремительного развития автономных систем, робототехники и интеллектуального анализа данных. Рост применения беспилотного транспорта, дронов, мобильных роботов и систем видеонаблюдения требует высокоточных методов предсказания перемещений динамических объектов в реальном времени. Неспособность современных алгоритмов гарантировать надежность прогнозов в условиях неопределенности среды, ограниченных вычислительных ресурсов и мультиагентных взаимодействий создает риски для безопасности и эффективности таких систем. Это определяет необходимость разработки новых адаптивных подходов, сочетающих точность машинных вычислений с физической достоверностью.

**Проблема исследования**. Существующие методы прогнозирования траекторий не обладают достаточной гибкостью и демонстрируют фундаментальные противоречия:

* Между точностью сложных ML-моделей (LSTM, Transformers) и их неинтерпретируемостью и ресурсоемкостью.
* Между универсальностью физических моделей и их неспособностью учитывать поведенческую неопределенность.
* Между требованиями к точности (минимальная ошибка) и ограничениями по использованию ресурсов (латентность, энергопотребление).

**Объектом исследования** являютсяпроцессы прогнозирования траекторий движения динамических объектов (транспортные средства, пешеходы, роботы) на основе ретроспективных данных и контекста среды.

**Предметом исследования являются** методы и алгоритмы прогнозирования траекторий, их математическое описание и программная реализация в виде встраиваемого модуля.

**Целью** исследования является повышение точности прогнозирования движения объектов разных классов в условиях динамически меняющейся среды за счёт проведения исследования применимости алгоритмов прогнозирования траектории движения объектов, разработки адаптивного гибридного алгоритма прогнозирования траекторий, обеспечивающего баланс точности, скорости работы и физической правдоподобности в условиях динамически изменяющейся среды.

Для достижения поставленной цели исследования были сформулированы следующие **задачи:**

1. Провести анализ современных подходов к прогнозированию траекторий (ML, физические, гибридные модели) и выявить их ограничения и область применимости.
2. Разработать архитектуру адаптивного алгоритма, динамически комбинирующего предиктивные модели на основе контекста (тип объекта, шум данных, ресурсы платформы).
3. Реализовать программный модуль с поддержкой мультимодального прогноза и оценкой неопределенности.
4. Эмпирически оценить эффективность алгоритма в реальных условиях.
5. Сформулировать рекомендации по применению в целевых областях (автономный транспорт, робототехника, охранные системы).

**Теоретическая значимость и научная новизна** заключаются в предложении методологии оценки адаптивности алгоритмов к неопределенности среды и в разработке и оценке алгоритма, способного производить универсальное предсказание положения объекта в пространстве.

**Практическая значимость** исследования состоит в реализации точного прогноза перемещений наблюдаемого объекта в пространстве, что позволит сопровождать, перехватывать и отслеживать объекты, а также повышать безопасность автоматизированных систем и снижать риски безопасности.

Разрабатываемый алгоритм имеет широкую область применения, охватывающую несколько ключевых индустрий. Автономные транспортные средства могут использовать алгоритм для предсказания траекторий пешеходов, велосипедистов и других участников дорожного движения. В робототехнике алгоритм применим для планирования пути мобильных и манипуляционных роботов в динамической среде.

Системы компьютерного зрения могут интегрировать алгоритм для отслеживания объектов в видеопотоках, включая системы видеонаблюдения. Аэрокосмическая отрасль представляет важную область применения для управления дронами, спутниками и ракетами.

Особое значение имеет применение в автоматизированных системах управления воздушным движением, где повышение эффективности подсистем наблюдения критически важно для безопасности полетов и оптимизации планирования потоков воздушных судов.

Разрабатываемое решение представляет собой алгоритмическую основу, которая впоследствии может быть интегрирована в различные системы управления. Таким образом, первичным продуктом исследования является алгоритм, который служит основой для создания программных модулей и их последующей интеграции в комплексные системы управления.

Алгоритм будет реализован в виде программного модуля, способного функционировать как автономно для исследовательских целей, так и в составе более крупных систем для практического применения. Архитектурная гибкость решения позволит адаптировать его под различные аппаратные платформы и операционные среды.

1. Процесс прогнозирования траектории движения объектов
   1. Предметная область

Прогнозирование траектории движения объектов — это междисциплинарная область, объединяющая методы программирования, машинного обучения, робототехники, физики и анализа данных. Её цель — предсказать будущее положение и динамику объектов в пространстве на основе текущих и исторических данных. Применение таких систем охватывает:

* **Автономные транспортные средства**: предсказание траекторий пешеходов, велосипедистов и других автомобилей.
* **Робототехнику**: планирование пути мобильных и манипуляционных роботов в динамической среде.
* **Компьютерное зрение**: отслеживание объектов в видео (например, в системах видеонаблюдения).
* **Аэрокосмическую отрасль**: управление дронами, спутниками и ракетами.

Ключевые процессы разработки алгоритмов прогнозирования траектории движения объектов включают в себя:

* **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 в симуляторах или реальных условиях.
* **Интеграция**: внедрение алгоритмов в управляющие системы (например, автопилот автомобиля).
* **Оптимизация**: Адаптация алгоритмов к ресурсным ограничениям целевых платформ.

# Проблемы предметной области

Предметная область процесса прогнозирования траектории движения объектов характеризуется высокой междисциплинарностью и практической значимостью для критически важных приложений. Ее ключевой вызов — преодоление противоречия между необходимостью точных прогнозов в условиях неопределенности и жесткими требованиями к производительности, надежности и безопасности.

Процесс прогнозирования траектории движения объектов носит комплексный характер и включает в себя следующие проблемы:

1. **Неопределённость и динамичность среды**

* **Шум в данных**: Датчики подвержены помехам (например, плохие погодные условия для камер автономных автомобилей).
* **Непредсказуемость поведения объектов**: Пешеходы или другие участники движения могут резко менять направление.
* **Динамические препятствия**: в робототехнике робот должен адаптироваться к перемещающимся объектам в режиме реального времени.

1. **Вычислительные ограничения**

* **Ресурсоёмкость алгоритмов**: Методы глубокого обучения (LSTM, Transformer) требуют значительных вычислительных мощностей, что затрудняет их использование (например, бортовых компьютерах дронов).
* **Латентность**: Задержки в прогнозировании критичны для автономных систем (даже 100 мс могут привести к аварии).

1. **Недостаток качественных данных**

* **Смещение в данных**: Обучающие наборы могут не отражать редкие, но опасные сценарии (например, экстренное торможение на высокой скорости).
* **Проблема симуляции**: Искусственные данные не всегда коррелируют с реальными условиями, что снижает точность моделей.

1. **Модельные ограничения**

* **Физические модели** (например, уравнения движения) не учитывают сложное поведение агентов.
* **ML-модели** (нейросети) страдают от "чёрного ящика": сложно интерпретировать их решения, что критично для безопасности.
* **Компромисс точности и скорости**: Точные модели (часто более сложные) могут быть неприменимы в реальном времени.

1. **Этические и правовые аспекты**

* **Ответственность за ошибки**: неверное прогнозирование может привести к авариям и жертвам.
* **Конфиденциальность**: Системы слежения могут нарушать приватность (например, распознавание лиц в публичных пространствах).

1. **Мультиагентные взаимодействия**

* В средах с множеством объектов (например, городское движение) возникает проблема координации прогнозов: траектория одного агента зависит от поведения других. Это требует сложных моделей взаимодействий (V2V — vehicle-to-vehicle).

# Анализ существующих методов решения задачи прогнозирования

Для прогнозирования траекторий движения объектов применяются различные методы, каждый из которых имеет свою область применения, преимущества и ограничения. Ниже представлены ключевые подходы:

1. **Физические (аналитические) модели**

Используют законы физики (уравнения кинематики, динамики) для моделирования движения.

**Область применения**:

* Управление спутниками, ракетами, дронами.
* Робототехника с предсказуемой средой (например, конвейерные системы).

**Примеры**:

* **Кинематические модели**: предсказание на основе скорости и ускорения.
* **Динамические модели**: учёт сил (трение, гравитация) через дифференциальные уравнения.

**Преимущества**:

* Высокая интерпретируемость.
* Низкие вычислительные затраты.
* Эффективны в стабильных условиях с известными параметрами.

**Недостатки**:

* Требуют точных начальных условий.
* Не адаптируются к динамическим изменениям среды.

1. **Статистические методы и машинное обучение**
   1. **Регрессионные модели**

Линейная регрессия, полиномиальная регрессия, Gaussian Processes (GP).

**Область применения**:

* Прогнозирование краткосрочных траекторий (например, движение автомобилей на шоссе).

**Преимущества**:

* Простота реализации.
* Быстрые вычисления.

**Недостатки**:

* Низкая точность при нелинейных зависимостях.
* Не подходят для многомерных данных.
  1. **Методы на основе LSTM (Long Short-Term Memory)**

Рекуррентные нейросети, обрабатывающие временные последовательности**.**

**Область применения**:

* Прогнозирование траекторий пешеходов, автомобилей в городской среде.

**Преимущества**:

* Учитывают долгосрочные временные зависимости.
* Устойчивы к шумам в данных.

**Недостатки**:

* Высокие требования к вычислительным ресурсам.
* Сложность интерпретации результатов.
  1. **Transformer-архитектуры**

Используют механизм внимания для анализа глобальных зависимостей в данных.

**Область применения**:

* Мультиагентное прогнозирование (например, взаимодействие нескольких транспортных средств).

**Преимущества**:

* Эффективны для долгосрочных прогнозов.
* Обрабатывают параллельные данные.

**Недостатки**:

* Большое количество параметров.
* Требуют больших наборов данных для обучения.
  1. **Генеративно-состязательные сети (GAN)**

Генератор создаёт траектории, дискриминатор оценивает их реалистичность.

**Область применения**:

* Моделирование множества возможных траекторий (например, движение пешеходов с вариативностью).

**Преимущества**:

* Генерируют разнообразные сценарии.
* Учитывают неопределённость среды.

**Недостатки**:

* Сложность обучения (проблема коллапса мод).
* Риск генерации физически невозможных траекторий.

**2.3. Гибридные подходы**

Комбинация физических моделей с ML.

**Область применения**:

* Автономные транспортные средства, где требуется сочетание точности и скорости.

**Примеры**:

* **Физически информированные нейросети (PINN)**: интеграция уравнений движения в архитектуру нейросети.
* **Модели на основе графов (GNN)**: учёт взаимодействий между агентами через графы (например, vehicle-to-vehicle).

**Преимущества**:

* Повышают точность за счёт учёта физических законов.
* Снижают риск генерации недостоверных прогнозов.

**Недостатки**:

* Сложность проектирования и оптимизации.
* Требуют экспертных знаний в обеих областях.

1. **Фильтры и байесовские методы**
   1. **Фильтр Калмана**

Рекуррентный алгоритм для оценки состояния системы на основе зашумлённых данных.

**Область применения**:

* Системы с низким уровнем шума (например, трекинг спутников).

**Преимущества**:

* Эффективен в реальном времени.
* Минимизирует ошибку при гауссовом шуме.

**Недостатки**:

* Предполагает линейность системы.
* Не подходит для нелинейных динамических моделей.
  1. **Частичные фильтры (Particle Filters)**

Используют множество "частиц" для представления распределения вероятностей.

**Область применения**:

* Трекинг в компьютерном зрении (например, движение людей в толпе).

**Преимущества**:

* Работают с нелинейными системами.
* Учитывают многомодальные распределения.

**Недостатки**:

* Высокие вычислительные затраты.
* Чувствительны к выбору параметров.

**2.5. Модели на основе графов (GNN, Graph Convolutional Networks)**

Моделируют взаимодействия между объектами через графы, где узлы — агенты, рёбра — их связи.

**Область применения**:

* Мультиагентные системы (например, городское движение, рои дронов).

**Преимущества**:

* Учитывают контекстные зависимости между агентами.
* Подходят для сцен с высокой плотностью объектов.

**Недостатки**:

* Сложность масштабирования.
* Требуют точных данных о взаимодействиях.

Краткое сравнение описанных алгоритмов представлено в Таблица 1 - Сравнительный анализ алгоритмов прогнозирования.

Таблица - Сравнительный анализ алгоритмов прогнозирования

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Метод | Точность | Скорость | Интерпретируемость | Применение |
| Физические модели | Низкая | Высокая | Высокая | Аэрокосмическая отрасль, роботы |
| LSTM | Средняя | Средняя | Низкая | Автономные транспортные средства |
| GAN | Средняя | Низкая | Низкая | Пешеходы, NPC в играх |
| Particle Filters | Средняя | Низкая | Средняя | Компьютерное зрение, роботы |
| GNN | Высокая | Средняя | Средняя | Городское движение, рои дронов |
| Transformer | Высокая | Низкая | Низкая | Мультиагентные сценарии |
| Гибридные модели | Высокая | Средняя | Средняя | Транспорт, дроны |
| Фильтр Калмана | Средняя | Высокая | Высокая | Навигация в простой среде |

Выбор метода зависит от контекста задачи:

* Для систем с жёсткими требованиями к латентности (дроны) подходят фильтры Калмана или физические модели.
* В сложных динамических средах (городское движение) доминируют ML-методы (LSTM, Transformer).
* Гибридные подходы и GNN применяются в задачах с взаимодействием агентов.
* GAN подходят для задач с высокой неопределённостью, где требуется генерация множества вариантов.
* Particle Filters остаются актуальными для нелинейных систем с ограниченными ресурсами.

Основной вызов — баланс между точностью, скоростью и ресурсозатратностью. Перспективным направлением является разработка легковесных архитектур нейросетей и улучшение интерпретируемости ML-моделей через гибридизацию с аналитическими методами.

# Критерии оценки решений для прогнозирования траекторий движения объектов

Сравнивать алгоритмы прогнозирования траектории движения объектов можно по набору критериев. Для определения эффективности и точности алгоритма применяются следующие оценки:

1. **Точность прогноза**
   1. **MSE (Mean Squared Error)**: Среднеквадратичная ошибка между предсказанной и реальной траекторией.
   2. **MAE (Mean Absolute Error)**: Средняя абсолютная ошибка по координатам.
   3. **Final Displacement Error (FDE)**: Ошибка в конечной точке траектории.
   4. **ADE (Average Displacement Error)**: Средняя ошибка по всем точкам траектории.
2. **Скорость работы**
   1. **Латентность**: Время генерации прогноза (мс).
   2. **Частота обновления**: Количество прогнозов в секунду.
3. **Устойчивость к шумам**

Оценка изменения точности (MSE, MAE) при добавлении шума в входные данные: искусственный шума (гауссов, импульсный), зашумленные данные с датчиков (например, LiDAR в дождь).

1. **Адаптивность**

Время, за которое модель возвращается к точному прогнозу после изменения условий: резкое изменение траектории, появление/исчезновение новых объектов на сцене.

1. **Ресурсоёмкость**
   1. Потребление оперативной памяти (RAM).
   2. Загрузка CPU/GPU (%) при работе.
   3. Энергоэффективность (ватт/прогноз).
2. **Масштабируемость**
   1. Изменение латентности и точности при увеличении числа объектов.
3. **Обобщающая способность**
   1. Работа на данных из "незнакомых" сред (например, модель, обученная на городских данных, тестируется на шоссе).
   2. Устойчивость к редким событиям (аварии, экстренное торможение).
4. **Учёт взаимодействий**

В качестве метрики можно использовать оценку F1.

* 1. **Collision Rate**: Процент прогнозов, приводящих к коллизиям в симуляции.
  2. **Social Compliance**: Соответствие прогноза социальным нормам (например, дистанция между пешеходами).

1. **Координация прогнозов**
   1. Согласованность траекторий нескольких агентов (например, автомобили на перекрёстке).
   2. Учёт группового поведения (например, движение толпы).

Краткое описание критериев оценивания алгоритмов представлено в Таблица 2 - Сравнительный анализ критериев оценки алгоритмов прогнозирования.

Таблица - Сравнительный анализ критериев оценки алгоритмов прогнозирования

|  |  |
| --- | --- |
| **Критерий** | **Метрики/Подходы** |
| Точность | MSE, MAE, FDE, ADE |
| Скорость | Латентность, количество прогнозов в единицу времени |
| Устойчивость к шумам | MSE при шуме |
| Адаптивность | Время восстановления к точному прогнозу |
| Ресурсоёмкость | RAM, CPU/GPU нагрузка |
| Масштабируемость | Латентность при N объектах |
| Обобщающая способность | F1-score |
| Учёт взаимодействий | Collision Rate, Social Compliance |
| Координация прогнозов | Учёт взаимодействия группы объектов |

# Обзор аналогов и научных статей

1. Использование универсального алгоритма прогнозирования для траекторной обработки в автоматизированных системах управления воздушным движением. Калинов С.Д., Земсков Ю.В. [1]
   1. **Актуальность**  
      Рост объемов воздушного движения требует повышения эффективности подсистем наблюдения в автоматизированных системах управления (АС УВД). Это необходимо для улучшения безопасности полетов, оптимизации планирования потоков воздушных судов (AMAN/DMAN) и снижения нагрузки на диспетчеров. Актуальность работы связана с поиском недорогих решений, не требующих модернизации аппаратной базы, через совершенствование алгоритмов обработки данных.
   2. **Существующие решения**

В современных АС УВД используются классические методы:

* + 1. **Альфа-бета фильтр**;
    2. **Фильтр Калмана**, настроенный на равномерное прямолинейное движение или стандартный разворот (3°/с).

Эти методы эффективны для простых траекторий (прямолинейное, круговое движение), но хуже справляются с маневрирующими воздушными судами (ВС) и сложными траекториями (например, "горизонтальная восьмерка").

* 1. **Постановка задачи**

Требуется повысить точность краткосрочного прогнозирования координат ВС в условиях разнообразия моделей движения и маневров. Ключевая проблема — адаптивность алгоритмов к неопределенным и изменяющимся траекториям без модернизации аппаратного обеспечения.

* 1. **Предлагаемое решение**

Авторы предлагают **универсальный алгоритм прогнозирования**, основанный на применении универсального фильтра - решения уравнения с гауссовым ядром:

,

где  — гауссово ядро,  — предыдущие прогнозы,  — наблюдаемые данные.  
Алгоритм демонстрирует лучшую точность (на 20% меньше среднеквадратическое отклонение) при моделировании сложных траекторий, таких как "горизонтальная восьмерка", по сравнению с классическими методами. Его универсальность позволяет использовать его в **многомодельных фильтрах**, что обеспечивает оптимальное сопровождение маневрирующих ВС. Решение особенно эффективно в условиях неопределенности и разнообразия моделей движения.

1. Применение фильтра Калмана в задачах трекинга воздушных объектов. М.Б. Пименова. [2]
   1. **Актуальность**  
      Точное отслеживание воздушных объектов (квадрокоптеров, самолетов, вертолетов) в режиме реального времени критически важно для систем безопасности, управления воздушным движением и компьютерного зрения. Актуальность работы обусловлена необходимостью решения проблем, связанных с окклюзией (перекрытием объектов), маневрированием целей, а также обработкой видеопотоков с высокой точностью и минимальными вычислительными затратами.
   2. **Существующие решения**
      1. **Фильтр частиц** — используется для трекинга, но требует больших вычислительных ресурсов.
      2. **Метод Виолы-Джонса** — эффективен для обнаружения объектов, но не адаптирован к динамическому отслеживанию.
      3. **Фильтр Калмана** — классический подход для предсказания состояний систем, применяемый в навигации и локализации. Однако его стандартные реализации могут быть недостаточно гибкими при резких изменениях траектории или окклюзии.
   3. **Постановка задачи**

Требуется разработать алгоритм трекинга воздушных объектов в видеопотоке, который:

* + 1. Корректно работает при частичном или полном перекрытии объекта (окклюзии).
    2. Адаптируется к маневрам и изменению скорости.
    3. Обеспечивает прогнозирование траектории в реальном времени.
    4. Устойчив к шумам и изменениям освещения.
  1. **Предлагаемое решение**

Авторы предлагают **модифицированный алгоритм на основе фильтра Калмана**, интегрированный с методами сегментации изображений. Ключевые особенности:

* + 1. Использование **цветовой сегментации и бинаризации** для выделения объекта на фоне.
    2. **Двухэтапная работа фильтра Калмана**: **Прогноз** — предсказание положения объекта на следующем кадре. **Коррекция** — уточнение данных на основе новых измерений.
    3. Решение проблемы окклюзии: при исчезновении объекта фильтр переходит в режим прогноза, а при его появлении — корректирует траекторию.
  1. Настройка параметров детектирования (порог сегментации, размер «блобов») для оптимизации быстродействия.

Алгоритм демонстрирует устойчивость к слабым окклюзиям и шумам, а также точное восстановление траектории после перекрытия. Ограничения: статичность сцены, неизменность формы и размеров объекта, зависимость от контраста между объектом и фоном. Перспективы: интеграция с методами SIFT/SURF для улучшения точности, учет динамических параметров (форма, размер) в векторе состояния.

1. Реализация фильтра частиц для построения траектории на графе. Кобелева А.О. [3]
   1. **Актуальность**  
      Локальное позиционирование объектов в шахтах критически важно, так как глобальные системы (GPS, ГЛОНАСС) не работают в условиях отсутствия спутникового сигнала. Существующие локальные методы часто имеют недостатки: низкую точность, высокую стоимость оборудования или сложность адаптации к динамическим условиям шахт. Актуальность работы связана с необходимостью разработки экономичных и точных алгоритмов для определения местоположения мобильных объектов в подземных условиях.
   2. **Существующие решения**
      1. **Глобальные системы** (GPS, ГЛОНАСС) — неприменимы в шахтах.
      2. **Локальные системы** — используют радиоизмерения, инерциальные датчики или гибридные методы. Однако они часто требуют дорогостоящего оборудования или не обеспечивают достаточной точности в сложных условиях шахт.
   3. **Постановка задачи**  
      Требуется разработать алгоритм, который:
      1. Привязывает траекторию движения объекта, полученную от инерциального измерительного модуля, к графу, моделирующему план шахты.
      2. Учитывает погрешности измерений.
      3. Обеспечивает определение местоположения объекта в реальном времени.
      4. Работает в условиях ограниченной видимости радиомаяков (РМП) и динамической среды.
   4. **Предлагаемое решение**

Авторы предлагают **алгоритм на основе фильтра частиц**, который:

* + 1. Использует **байесовскую фильтрацию** для оценки состояния объекта.
    2. Интегрирует данные от инерциального модуля (ускорение, направление) и радиомаяков.
    3. Моделирует движение частиц на графе шахты, что позволяет сопоставлять реальную траекторию с картой.

Алгоритм демонстрирует высокую точность при условии размещения РМП на оптимальном расстоянии. Ограничения: зависимость от качества карты (графа) шахты и точности инерциальных данных. Перспективы: применение на реальных данных, интеграция с другими методами локализации для повышения устойчивости.

1. Прогнозирование траектории движущейся цели с использованием фото-данных и фильтра частиц. Нгуен Минь Хонг. [4]
   1. **Актуальность**  
      Прогнозирование траектории движущихся целей критически важно для военных и гражданских задач (наблюдение, медицина, безопасность). Актуальность работы обусловлена **нелинейностью движения целей** в реальных условиях и ограничениями классических методов (например, фильтра Калмана), которые предполагают линейность системы. Точное отслеживание требует учета шумов, сложных траекторий и данных с камер, что делает разработку нелинейных алгоритмов ключевой проблемой.
   2. **Существующие решения**
      1. **Фильтр Калмана и его модификации** (расширенный EKF, UKF) — широко применяются, но неэффективны для нелинейных систем.
      2. **Гибридные методы** (например, комбинация EKF и UKF) — улучшают точность, но остаются ограниченными из-за линейных допущений.
      3. **Оптические методы** — используют данные камеры, но требуют интеграции с алгоритмами фильтрации для обработки шумов.
   3. **Постановка задачи**

Требуется разработать алгоритм, который:

* + 1. **Прогнозирует состояние цели** (положение, скорость, направление) в трехмерном пространстве.
    2. Учитывает **нелинейность движения** и **шумовые помехи** в данных камеры.
    3. Обеспечивает **высокую точность** даже при отклонениях измерений от реальных значений.
    4. Работает в режиме **реального времени** с балансом между вычислительной нагрузкой и точностью.
  1. **Предлагаемое решение**

Автор предлагает **алгоритм на основе фильтра частиц**, который:

* + 1. Использует **нелинейные модели движения** для описания состояния цели (координаты, скорость, углы).
    2. Интегрирует данные с камеры, преобразованные в систему координат камеры, с учетом шумов.

Фильтр частиц демонстрирует **более высокую точность** по сравнению с фильтром Калмана, особенно при резких изменениях траектории (например, угла φ). **Ограничения**: высокая вычислительная нагрузка из-за большого числа частиц, необходимость балансировки между точностью и скоростью. **Перспективы**: оптимизация параметров, интеграция с методами снижения шумов, применение в системах реального времени.

1. Прогнозирования движения объектов. Коптев Б.А., Розов А.К., Романовский А.Ф. [5]
   1. **Актуальность**  
      Прогнозирование движения объектов критически важно для систем, где ошибки измерений и устаревание данных расширяют область возможных координат объекта (например, в противовоздушной обороне). Актуальность работы связана с **необходимостью минимизировать ошибки прогноза** при ограниченном времени вычислений, что особенно важно для задач реального времени.
   2. **Существующие решения**
      1. Методы, основанные на **внешнетраекторных измерениях**, но они не обеспечивают точного прогноза.
      2. Подходы, требующие **оптимизации всего комплекса** (измерения + прогноз), но их реализация сложна из-за противоречия между точностью и скоростью.
      3. Линейные фильтры, которые не всегда учитывают нестационарность процессов.
   3. **Постановка задачи**

Требуется разработать алгоритм, который:

* + 1. **Фильтрует шумы** в данных измерений.
    2. **Прогнозирует координаты** объекта с минимальными ошибками.
    3. **Балансирует между точностью и временем вычислений**.
  1. **Предлагаемое решение**

Авторы предлагают **линейный нестационарный фильтр Калмана–Бьюси**, который:

* + 1. Моделирует траекторию.
    2. Использует **стохастические дифференциальные уравнения** для фильтрации и прогноза.
    3. Включает этапы:
       - **Фильтрация** — оценка параметров траектории (координаты, скорость, ускорение).
       - **Прогноз** — экстраполяция траектории на основе оцененных параметров.

**Моделирование** подтвердило, что ошибки фильтрации уменьшаются с ростом времени наблюдения. **Преимущества**: метод обеспечивает приемлемую точность прогноза, особенно при длительном времени наблюдения. **Ограничения**: ошибки прогноза растут с удалением от момента окончания фильтрации. **Перспективы**: применение в системах противодействия, где требуется баланс между скоростью и точностью.

1. Применение искусственной нейронной сети для решения задач прогнозирования движения наземных объектов. Соколов Д.Ю. [6]
   1. **Актуальность**  
      Прогнозирование движения наземных объектов критически важно для военных (наведение вертолётов на маневрирующие цели) и гражданских задач (отслеживание объектов беспилотниками). Актуальность обусловлена **необходимостью учета нелинейных траекторий**, которые не описываются классическими методами интерполяции и экстраполяции. Кроме того, существующие нейросетевые подходы часто игнорируют последовательность прохождения точек, что снижает точность прогноза.
   2. **Существующие решения**
      1. **Математическое моделирование** — эффективно только для линейных или полиномиальных траекторий.
      2. **Нейронные сети общего назначения** — не учитывают последовательность точек и пространственную привязку, что ограничивает их применение.
      3. **Рекуррентные сети** — частично решают проблему последовательности, но требуют сложной обработки данных.
   3. **Постановка задачи**

Требуется разработать нейронную сеть, которая:

* + 1. Учитывает **последовательность прохождения точек** траектории.
    2. Отражает **пространственную привязку** объекта к участку местности.
    3. Работает с **нелинейными траекториями** без сложных математических преобразований.
    4. Обеспечивает **режим реального времени** с балансом между точностью и вычислительной нагрузкой.
  1. **Предлагаемое решение**

Авторы предлагают **пространственно-закреплённую рекуррентную нейронную сеть** (НС), где:

* + 1. Каждый нейрон соответствует точке или области пространства.
    2. Архитектура включает **рекуррентные связи**, что позволяет учитывать последовательность точек.
    3. Используются алгоритмы обучения:
       - **Модифицированное правило Хебба** — с коэффициентом забывания для адаптации к новым данным.
       - **Правило Видроу-Хоффа** — для минимизации ошибки через итеративное обучение.
       - **Алгоритм Кохонена** — с коррекцией весов в окрестности нейрона-победителя.
    4. Обучение проводится на статистических данных, где входной вектор отражает принадлежность точек к траектории (1 — присутствует, 0 — отсутствует).

**Преимущества**: Сеть демонстрирует высокую точность прогноза даже для сложных траекторий. Учет пространственной привязки снижает влияние шумов и улучшает адаптацию к изменениям. Возможность масштабирования на гиперпространство (3D и более). **Ограничения**: Высокая вычислительная нагрузка при большом количестве нейронов. Зависимость от качества обучающих данных и выбора коэффициентов. **Перспективы**: Применение в военных системах наведения, гражданской авиации, прогнозировании движения морских объектов и даже в финансовой аналитике. Интеграция с методами снижения шумов и оптимизации параметров для работы в реальном времени.

1. алгоритм прогнозирования траектории движения цели. Мельников П.Н. [7]
   1. **Актуальность**  
      Прогнозирование траектории движения цели критически важно для эффективной работы зенитных артиллерийских комплексов. Актуальность работы обусловлена **необходимостью минимизации ошибок прогноза** в условиях:
      1. Отсутствия информации о будущих маневрах цели.
      2. Погрешностей измерений параметров движения (дальность, углы, скорость).
      3. Ограничений неуправляемой траектории снаряда.
   2. **Существующие решения**
      1. **Фильтрация параметров движения** (координаты, скорости, ускорения) с использованием апериодических фильтров.
      2. **Прогнозирование через разложение в ряд Тейлора** в прямоугольной системе координат.
      3. **Преобразование данных** из сферической системы координат (измерения) в прямоугольную (прогноз). Однако, эти методы имеют недостатки: высокие ошибки для криволинейных траекторий (круговые, пикирование), зависимость точности от степени производных и времени прогноза.
   3. **Постановка задачи**

Требуется разработать алгоритм прогнозирования, который:

* + 1. Учитывает **непредсказуемые маневры цели** (изменение скорости, направления).
    2. Минимизирует **методические погрешности** для сложных траекторий.
    3. Обеспечивает баланс между точностью фильтрации и устойчивостью к шумам.
    4. Работает в режиме реального времени с ограниченными вычислительными ресурсами.
  1. **Предлагаемое решение**

Автор предлагает **два алгоритма прогнозирования**:

* + 1. Разложение в ряд Тейлора для прогноза координат на основе текущих оценок скорости и ускорения. Эффективен для прямолинейных и параболических траекторий, но дает ошибки при круговом движении.
    2. Прогнозирование в системе координат, связанной с **вектором скорости цели**. Учитывает продольное и поперечное ускорения, что снижает ошибки для криволинейных траекторий.

**Преимущества**: Прогнозирование в системе координат, связанной с вектором скорости цели снижает ошибки на 20–30% для маневренных целей. Фильтрация параметров улучшает устойчивость к шумам измерений. **Ограничения**: зависимость точности от времени прогноза, особые точки в расчетах (например, при нулевой горизонтальной скорости). **Перспективы**: интеграция с адаптивными алгоритмами для автоматического выбора оптимального метода прогноза. Применение машинного обучения для предсказания маневров на основе исторических данных.

# Выводы по Главе 1

Прогнозирование траекторий — это сложная задача, где технические проблемы (точность, скорость, надёжность) переплетаются с этическими и практическими ограничениями. Успешное решение требует не только разработки продвинутых алгоритмов, но и учёта контекста их применения, интеграции с аппаратными системами и соблюдения нормативных требований. Эти вызовы формируют основу для дальнейшего исследования, включая выбор методов программирования и оптимизаций, которые будут рассмотрены в следующих разделах работы.

Список использованных источников

1. Калинов С.Д., Земсков Ю.В. Использование универсального алгоритма прогнозирования для траекторной обработки в автоматизированных системах управления воздушным движением // Информационные технологии и анализ данных.
2. Пименова М.Б. Применение фильтра Калмана в задачах трекинга воздушных объектов // Политехнический молодежный журнал, 2019, № 12(41).
3. Кобелева А.О. Реализация фильтра частиц для построения траектории на графе. [Электронный ресурс] URL: <https://cs.petrsu.ru/~olbgvl/distant-learning/PodgotovkaNTT/Kobeleva_22503_7.pdf> (дата обращения 12.06.2025).
4. Нгуен М. Х. Прогнозирование траектории движущейся цели с использованием фото-данных и фильтра частиц // [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-traektorii-dvizhuscheysya-tseli-s-ispolzovaniem-foto-dannyh-i-filtra-chastits/viewer> (дата обращения 12.06.2025).
5. Коптев Б. А., Розов А. К., Романовский А. Ф. Прогнозирование движения объектов // Обработка информации и управление №6, 2003.
6. Соколов Д. Ю. Применение искусственной нейронной сети для решения задач прогнозирования движения наземных объектов // Труды МАИ. 2022. № 123.
7. Мельников П. Н. Алгоритм прогнозирования траектории движения цели // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 8.
8. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации: Учеб. Пособие // Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев и др.; Под ред. С. Г. Пятко и А. И. Красова – СПб.: Политехника, 2004 – 446с.: ил.
9. Калман Р.Е., Бьюси Р.С. Новые результаты в линейной фильтрации и теория предсказания // Пер. с англ. – Техническая механика – 1961. – №83. – Сер. Д. 1.
10. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986.
11. Мокшин В.В., Кирпичников А.П., Шарнин Л.М. Отслеживание объектов в видеопотоке по значимым признакам на основе фильтрации частиц. Вестник Казанского технологического университета, 2013, № 18, с. 298–303.
12. Агафонов В.Ю., Розалиев В.Л., Заболеева-Зотова А.В. Использование фильтра Калмана в задачах трекинга объектов. Интеллектуальные системы. Теория и приложения, 2016, т. 20, № 4, с. 13–17.
13. Bochem A., Herpers R., Kent K.B. Hardware acceleration of blob detection for image processing. 3rd Int. Conf. Advances in Circuits, Electronics and Micro-Electronics, 2010, pp. 28–33. [Электронный ресурс] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5558171> (дата обращения 13.06.2025).
14. Голубков, А. В. Моделирование движения объекта по сложной траектории с возможностью скорейшего обнаружения изменения и идентификации режима движения // диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук: 05.13.18 / Голубков Александр Владимирович. – Ульяновск : УлГУ, 2022. – 140 с.
15. Alahi, A. Social LSTM: Human Trajectory Prediction in Crowded Spaces / A. Alahi, K. Goel, V. Ramanathan [et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – 2016. – P. 961-971.
16. Comparative evaluation of Kalman filters and motion models in vehicular state estimation and path prediction / A. Munoz-Banon, F. Candelas, S. Torres-Medina // The Journal of Navigation. – 2021. – Vol. 74, № 5. – P. 1142-1160.
17. Luo, A. An improved transformer-based model for long-term 4D trajectory prediction in civil aviation / A. Luo, Y. Luo, S. Zhang [et al.] // IET Intelligent Transport Systems. – 2024. – Vol. 18, № 7. – P. 1245-1258.
18. Li, M. PoPPL: Pedestrian Trajectory Prediction by LSTM With Automatic Route Class Clustering / M. Li, Z. Zhao, C. Adlam [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2021. – Vol. 32, № 1. – P. 77-90.
19. Song, Q. Intelligent Optimization Algorithm-Based Path Planning for a Mobile Robot / Q. Song, S. Zhao, M. Wang [et al.] // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2021. – Vol. 2021. – Art. 8025715.
20. Wang, Y. Trajectory Forecasting With Neural Networks: An Empirical Evaluation and A New Hybrid Model / Y. Wang, D. Zhang, Y. Liu, K.-L. Tan // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2020. – Vol. 21, № 4. – P. 1843-1857.