

На правах рукописи

И Цзяньфэн

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СИСТЕМЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
КОМПОНЕНТОЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПАРКОВКИ  
АВТОМОБИЛЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

湯劍峰

Москва – 2025

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

Научный руководитель:

**Селезнева Мария Сергеевна**, к.т.н., доцент, доцент кафедры технологий приборостроения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

**Ханова Анна Алексеевна**, доктор технических наук, доцент, профессор Астраханского государственного технического университета

**Андриков Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент Российского университета дружбы народов (РУДН)

Ведущая организация:

Общество с ограниченной ответственностью «Инскултех»

Защита состоится «15» Апреля 2025 г. в 14 час 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., д. 10, ауд. 613м.

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

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

Автореферат разослан «\_\_\_» 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

Муратов Игорь Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Постоянный рост мирового населения и бурное развитие экономики, науки и технологий привели к резкому увеличению количества транспортных средств в городах, а парковочные места становятся всё более плотными и узкими. В сложной городской парковочной среде даже опытные автомобилисты сталкиваются с трудностями при парковке. Поэтому парковка автомобиля считается одним из наиболее сложных маневров.

Достижения в кибернетике, информатике и, в частности, в области искусственного интеллекта привели к решению сложной проблемы парковки автомобиля. В современных автомобилях все чаще устанавливаются системы автоматической парковки, и способность автоматической парковки становится одной из самых популярных среди различных функций беспилотных автомобилей. Конечная цель интеллектуальной системы парковки автомобиля – предоставить людям возможность достичь «свободы последней мили».

Существующие системы автоматической парковки автомобиля включают блок сбора данных об окружающей среде, блок принятия решения о траектории и исполнительные устройства. Блок сбора данных об окружающей среде обычно состоит из системы получения изображений и системы определения расстояния, установленных на транспортном средстве (например, с использованием ультразвуковых датчиков или радиолокационных систем миллиметрового диапазона).

Анализ существующих систем автоматической парковки автомобиля показывает, что такие системы предъявляют строгие требования к расположению, направлению и размеру парковочного места и справляются со сложными условиями не лучше, чем опытные автомобилисты. Таким образом, первой ключевой задачей автоматической парковки является достижение высокоточного позиционирования автомобиля на парковочной площадке и построение карты парковки.

В настоящее время измерительные комплексы позиционирования беспилотных автомобилей состоят из инерциальных навигационных систем, приёмников спутниковых систем Бэйдоу/GPS, лазерных измерительных систем, радиолокационных систем миллиметрового диапазона и систем определения расстояния по изображению. Точность позиционирования автомобиля зависит от условий эксплуатации, конструктивных особенностей измерительных систем и их алгоритмического обеспечения. Алгоритмическое обеспечение измерительных систем автомобиля включает алгоритмы оценивания, управления, прогнозирования и комплексирования. Наиболее точную информацию удаётся получить при использовании алгоритмов комплексирования.

Второй ключевой задачей автоматической парковки является стабильная и безопасная реализация управления парковкой автомобиля. Существующие алгоритмы управления парковкой в основном состоят из двух частей: планирования траектории и отслеживания траектории. Использование этих алгоритмов накладывает строгие ограничения на начальное и конечное местоположение и ориентацию автомобиля и может применяться только в статических средах.

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в создание теории интеллектуального управления подвижными объектами и их алгоритмического обеспечения внесли Лохина В.М., Пролетарский А.В., Макарова И.М., Федосов Е.А., Васильев С.Н., Жерлов А.К. Li T.H., Li T.S. и др. Разработкой алгоритмов повышении точности навигационных систем успешно занимались К.А. Неусыпин, Н.Т. Кузовков, Селезнёва М.С., Фам С.Ф., Шень Кай, Чжан Лифэй и др. Разработкой алгоритмов одновременной локализации и картографирования с помощью лидара успешно занимались J. Zhang, S. Singh, T. Shan, B. Englot и др.

**Целью работы** является разработка системы автоматического управления парковкой автомобиля с использованием интеллектуальных технологий.

Для достижения поставленной цели решаются **следующие основные задачи:**

1. Анализ особенностей современных автоматических систем парковки автомобиля, исследование и сравнение автоматических систем управления и систем управления с интеллектуальной компонентой;
2. Разработка алгоритма позиционирования и картографирования автомобиля с использованием инерциального измерительного прибора (ИИП) и лидара, выполняющего коррекцию погрешностей ИИП с помощью адаптивного фильтра Калмана;
3. Разработка метода определения препятствий и прогнозирования действий движущихся объектов на основе трехмерной карты облака точек для повышения безопасности и эффективности процесса парковки;
4. Разработка алгоритма планирования траектории парковки автомобиля;
5. Разработка алгоритма управления парковкой, позволяющего обновлять стратегию управления парковкой в соответствии с изменениями окружающей среды.

**Методы исследования.** При решении сформулированных задач использовались методы теории автоматического управления, навигационных систем, методы оценивания, интеллектуальных систем, метод самоорганизации, метод трехмерного картографирования, математического моделирования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны алгоритм позиционирования и картографирования с использованием ИИП и лидара, алгоритм управления парковкой автомобиля, которые основаны на теории функциональных систем и способны изменять рабочий контур в зависимости от различных условий движения автомобиля;
2. Разработан алгоритм одометрии и картографирования с подходом тесной связи лидара и ИИП, который в отличие от аналогов селективно реализует процедуру картографирования с помощью анализа угла курса;
3. Разработан адаптивный скалярный фильтр Калмана, способный функционировать в условиях отсутствия априорной информации о дисперсиях входного и измерительного шумов, отличается формированием коэффициента усиления;
4. Разработан метод определения препятствий и прогнозирования действий движущихся объектов, основанный на алгоритме *L*-образной

аппроксимации и алгоритме самоорганизации с линейным трендом, обеспечивающий ускорение процесса построения модели;

5. Разработаны алгоритм планирования траектории парковки и алгоритм управления парковкой автомобиля с помощью нелинейного MPC-регулятора и алгоритма построения модели автомобиля для различных углов поворота, позволяющий учитывать нелинейный характер траектории.

**Достоверность и обоснованность** полученных теоретических и практических результатов подтверждаются корректным использованием базовых методов и математических положений при разработке алгоритмов, а также согласованностью известных и полученных в работе результатов.

### **Практическая значимость диссертации.**

Использование разработанного алгоритма комплексирования позволило выбирать оптимальную структуру измерительного комплекса в различных ситуациях парковки автомобиля. Разработанная система позиционирования и картографирования позволяет обеспечить точные местоположения и ориентации автомобиля, а также сформировать точной 3D-карты облака точек. Разработанный метод определения препятствий по 3D-картам облака точек позволяет быстро определить припаркованные автомобили, доступные парковочные места и движущиеся объекты. Метод прогнозирования действий движущихся объектов позволяет определить, повлияют ли движущиеся объекты на процесс парковки, а разработанная система управления парковкой с интеллектуальной компонентой позволяет скорректировать стратегию парковки.

Результаты диссертационного исследования использованы в учебных процессах кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана и ООО “РТСофт-СГ”.

### **Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм позиционирования и картографирования с использованием ИИП и лидара, способный изменять структуру в зависимости от условий движения автомобиля, обеспечивает высокую точность парковки и большую скорость вычислений;

2. Адаптивный скалярный фильтр Калмана для оценивания погрешностей ИИП позволяет компенсировать ошибки навигационных определений с большей точностью за счет использования полного вектора проведенных измерений;

3. Метод определения препятствий и прогнозирования действий движущихся объектов с помощью алгоритма самоорганизации с линейным трендом обеспечивает высокую точность и скорость построения маршрута;

4. Система управления парковкой с интеллектуальной компонентой, снабженная алгоритмом планирования траектории парковки и алгоритмом управления парковкой позволяет безопасно с высокой точностью реализовать маршрут парковки за счет изменения модели MPC-регулятора.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследований докладывались и обсуждались на ряде конференций: двенадцатая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019 г.); Наука, технологии и бизнес (Москва, 2020 г.); XXIX Санкт-

Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2022 г.); International Russian Automation Conference RusAutoCon 2022 (Сочи, 2022 г.); The 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (Чэнду, Китай, 2022 г.); Юбилейная XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2023 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работы, из них 5 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ, 4 статьи в журналах, входящих в перечень Scopus.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четыре глав, общих выводов и заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 135 машинописных страницах, содержит 39 рисунок и 4 таблиц. Список литературы содержит 105 источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и основные задачи исследования, раскрываются научная новизна, практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведён системный анализ существующих автоматических систем парковки автомобилей, а также выполнено сравнение уровня разработанности каждого модуля в общей структуре этих систем: модуля восприятия окружающей среды, модуля планирования траектории и модуля управления парковкой. Выявлены их недостатки и намечены пути совершенствования алгоритмических структур с использованием теории функциональных систем и теории оптимального управления.

**Во второй главе** рассмотрены задачи позиционирования и картографирования автомобиля в реальном времени. Для повышения точности алгоритма лидарной одометрии и сокращения объема вычислений предложен метод селективных алгоритмов одометрии и картографирования. Разработан метод определения препятствий и прогнозирования действий движущихся объектов. Разработана система позиционирования с интеллектуальной компонентой на основе теории функциональных систем, состоящая из алгоритма построения модели, алгоритма прогноза и ансамбля критериев селекции. Алгоритм оценивания для повышения точности погрешностей ИИП представляет собой адаптивную модификацию фильтра Калмана.

Для сокращения объема вычислений предлагается разработать **метод селективного алгоритма одометрии и алгоритма картографирования** с подходом тесной связи лидара и ИИП.

Чтобы устранить искажение движения облака точек, при отображении каждой точки переменные состояния лидара рассчитываются на основе высокочастотных данных позиционирования от ИИП. Затем все точки корректируются в координатах начальной точки с помощью преобразования переноса и поворота. После этого из облака точек удаляются точки земли и кластеры точек с размытыми геометрическими признаками.

Разделим точки в облаке точек на угловые точки и плоскостные точки. Определим классификацию точек в зависимости от их значений кривизны  $c$ , рассчитанной с помощью следующей формулы:

$$c = \frac{1}{|S| \cdot \|X_{(k,i)}^L\|} \left\| \sum_{j \in S, j \neq i} (X_{(k,i)}^L - X_{(k,j)}^L) \right\|, \quad (1)$$

где  $L$  – система координат лидара;  $X_{(k,i)}^L$  – координаты  $i$ -ой точки в неискаженном облаке точек  $P_k^*$ ;  $S$  – множество точек, ближайшие к  $i$ -ой точке.

Для равномерного распределения характерных точек трёхмерной картины развертка делится на шесть горизонтальных областей. Точки в облаке сортируются по значению кривизны  $c$ : с максимальными значениями  $c$  выбираются как угловые точки, а с минимальными – как плоскостные.

Для оценки движения лидара необходимо определить геометрическую связь между  $k$ -м и  $(k-1)$ -м сканированиями лидара по следующим уравнением:

$$f(T_k^L) = d; \begin{cases} f_c(X_{(k,i)}^{L,C}, T_k^L) = d_c \\ f_s(X_{(k,i)}^{L,S}, T_k^L) = d_s \end{cases} \quad (2)$$

Геометрическое преобразование облака точек  $k$ -го сканирования имеет вид:

$$\begin{bmatrix} X_{(k,i)}^L \\ 1 \end{bmatrix} = T_k^L \cdot \begin{bmatrix} \tilde{X}_{(k,i)}^L \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $X_{(k,i)}^L$  – координата  $i$ -й характерной точки на  $k$ -м сканировании;  $\tilde{X}_{(k,i)}^L$  – преобразованная координата характерной точки;  $T_k^L = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & D_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  – кососимметрическая матрица, которая включается в себя матрицу преобразования поворота  $R$  и вектор параллельного переноса  $D$ .

Чтобы рассчитать расстояние между наборами характерных точек двух разверток, для угловых точек в  $C_k^L$  и плоскостных точек в  $S_k^L$  необходимо определить соответствующие краевые линии в  $C_{k-1}^L$  и соответствующие плоскости в  $S_{k-1}^L$  соответственно. Поэтому расстояние между наборами характерных точек двух разверток может рассчитаться по следующим формулой:

$$d_c = \frac{|(X_{(k,i)}^{L,C} - X_{(k-1,j)}^{L,C}) \times (X_{(k,i)}^{L,C} - X_{(k-1,l)}^{L,C})|}{|X_{(k-1,j)}^{L,C} - X_{(k-1,l)}^{L,C}|} \\ d_s = \frac{|(X_{(k,i)}^{L,S} - X_{(k-1,j)}^{L,S}) \cdot (X_{(k-1,j)}^{L,S} - X_{(k-1,l)}^{L,S}) \times (X_{(k-1,j)}^{L,S} - X_{(k-1,m)}^{L,S})|}{|(X_{(k-1,j)}^{L,S} - X_{(k-1,l)}^{L,S}) \times (X_{(k-1,j)}^{L,S} - X_{(k-1,m)}^{L,S})|}, \quad (4)$$

где  $L$  – лидарная система координат;  $d_c$  – расстояние от  $i$ -го угловой точки в  $C_k^L$  до краевой линии в  $C_{k-1}^L$ ;  $d_s$  – расстояние от  $i$ -го плоскостной точки в  $S_k^L$  до плоскости в  $S_{k-1}^L$ ;  $X_{(k-1,j)}^{L,C}, X_{(k-1,l)}^{L,C}$  – координаты двух точек в  $C_{k-1}^L$ , ближайших к  $i$ -й угловой точке в  $C_k^L$ ;  $X_{(k-1,j)}^{L,S}, X_{(k-1,l)}^{L,S}, X_{(k-1,m)}^{L,S}$  – координаты трёх точек в  $S_{k-1}^L$ , ближайших к  $i$ -й плоской точке в  $S_k^L$ .

Таким образом, задача оценки движения лидара, которая представляется собой задачу нелинейной оптимизации, решена с помощью нелинейных итераций путем минимизации  $d$  до нуля.

Вышеупомянутый алгоритм представляет собой алгоритм лидарной одометрии. Алгоритм лидарного картографирования имеет тот же принцип, что и алгоритм лидарной одометрии, но разница в том, что регистрация облаков точек осуществляется между облаком точек  $k$ -го сканирования и глобальной трехмерной картой облака точек. Глобальная трехмерная карта облака точек сформируется путем выравнивания всех облаков характерных точек в зависимости от оценок местонахождения и ориентации лидара. Алгоритм лидарного картографирования имеет более высокую точность, но в то же время требует большого объема вычислений.

Таким образом, предлагается критерий селекции  $\tau$ , полученный с помощью МГУА, имеет вид:

$$\tau = d_y/d_\theta, \quad (5)$$

где  $d_y$  – последовательность преобразования перемещения лидара по оси  $y$ ;  $d_\theta$  – последовательность преобразования углов курса.

В соответствии критерия селекции  $\tau$  используется алгоритм лидарной одометрии или алгоритм картографирования.

**Алгоритм  $L$ -образной аппроксимации** используется в качестве алгоритма определения объекта, который позволяет найти наиболее подходящий прямоугольник для каждого кластера точек. Критерием оценки эффективности  $L$ -образной аппроксимации является метод наименьших квадратов, который заключается в следующей задаче оптимизации:

$$e = \min_{\alpha, c_1, c_2} \sum (x_i \cos \alpha + y_i \sin \alpha - c_1)^2 + \sum (y_i \cos \alpha - x_i \sin \alpha - c_2)^2, \quad (6)$$

где  $c_1$  – линия, параллельная оси  $X$ ;  $c_2$  – линия, параллельная оси  $Y$ ;  $\alpha$  – угол курса кластера точек, то есть угол, на который кластер точек вращается вокруг начала координат;  $(x_i, y_i)$  – двумерные координаты точки на плоскости.

Для повышения вычислительной эффективности алгоритма определения предлагается алгоритм самоорганизации с линейным трендом для прогнозирования угла курса автомобиля, который имеет вид:

$$\hat{\alpha}_{k+1} = \hat{\alpha}_k + \Delta, \quad (7)$$

где  $\hat{\alpha}_k$  – угол курса  $k$ -го кластера;  $\Delta$  – линейный тренд.

Алгоритм самоорганизации с резервированием трендов используется в качестве алгоритма прогнозирования действий движущихся объектов, так как траектории движения нескольких объектов относительно неупорядочены, и измерения местонахождения движущихся объектов невелики.

После получения прогнозов траекторий движения движущихся объектов проводится сравнение их с запланированному маршруту парковки, чтобы определить, будут ли движущиеся объекты влиять на немедленную реализацию управления парковкой автомобиля. Процесс автоматической парковки автомобиля обычно завершается в течение полминуты. Если движущиеся объекты влияют на процесс парковки автомобиля, система лидара продолжит сканирование

и расчет траектории движения движущихся объектов, и продолжит осуществлять управление парковкой автомобиля после определения безопасности.

**Система позиционирования автомобиля с интеллектуальной компонентой** разработана на основе теории функциональных систем П.К. Анохина, её структура представлена на Рис. 1.

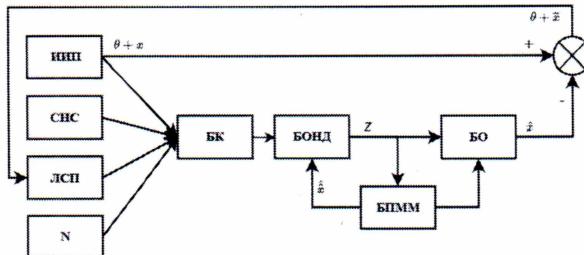


Рис. 1 Структура ИСПА с интеллектуальной компонентой

На Рис. 1 введены следующие обозначения:

СНС – спутниковая навигационная система; ЛСП – лидарная система позиционирования;  $Z$  – измерительные данные погрешности ИИП;  $\theta$  – истинная информация позиционирования автомобиля;  $x$  – погрешности ИИП;  $\hat{x}$  – оценки погрешности ИИП;  $\tilde{x}$  – ошибка оценивания;  $\hat{\tilde{x}}$  – прогноз погрешностей ИИП; БК – блок комплексирования; БОНД – блок объединения навигационных данных; БО – Блок оценивания; БПММ – блок построения математической модели.

В блоке БК формируются измерения ИСПА путем алгебраического вычитания сигналов ИИП и дополнительных навигационных приборов. В БОНД выбирается дополнительный прибор с наиболее достоверными измерительными данными для формирования оптимальной комбинации с ИИП, формируются измерения для алгоритмов оценивания и алгоритма построения прогнозирующей модели. Определяются достоверные измерительные данные с помощью критерия степени наблюдаемости. Критерий степени наблюдаемости представляет собой качественную характеристику наблюдаемых компонент вектора состояния и с его помощью определяются наилучшие датчики информации.

В дискретной форме априорная модель погрешностей ИИП имеет вид:

$$x_k = A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}W_{k-1}, \quad (8)$$

где  $x_k = \begin{bmatrix} \delta S_k \\ \delta V_k \\ \delta \theta_k \end{bmatrix}$ ,  $A_{k-1} = \begin{bmatrix} I & I \cdot T & 0 \\ 0 & I & -R[a_{k-1}] \times T \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}$ ,  $W_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_b \\ \omega_b \end{bmatrix}$ ,

$$B_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R \cdot T & 0 \\ 0 & 0 & -R \cdot T \end{bmatrix}, [a_{k-1}] \times = \begin{bmatrix} 0 & -a_{k-1}^z & a_{k-1}^y \\ a_{k-1}^z & 0 & -a_{k-1}^x \\ -a_{k-1}^y & a_{k-1}^x & 0 \end{bmatrix},$$

$x_k$  – вектор состояния погрешности объекта;  $A_{k-1}$  – фундаментальная матрица системы;  $W_{k-1}$  – вектор входного возмущения;  $B_{k-1}$  – матрица шума процесса;  $\delta S_k$  – погрешность в определении местонахождения автомобиля;  $\delta V_k$  – погрешность в определении скорости автомобиля;  $\delta \theta_k$  – погрешность в определении ориентации автомобиля;  $T$  – период дискретизации;  $R$  – матрица ориентации автомобиля;  $a_{k-1}$  – ускорение, измеренное акселерометром;  $a_b$  – смещение акселерометра;  $\omega_b$  – смещение гироскопа.

Уравнение измерений погрешности ИИП имеет вид:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (9)$$

Численный критерий степени наблюдаемости имеет вид:

$$\lambda_k^i = \frac{M[(x_k^i)^2]}{M[(y_k^i)^2] \sum_{j=1}^l \varsigma_{ij}^2}, \quad (10)$$

где  $M[(x_k^i)^2]$  – дисперсия произвольной  $i$ -ой компоненты вектора состояния;  $M[(y_k^i)^2]$  – дисперсия формируемого измеряемого вектора состояния  $y$ ;  $\varsigma_{ij}$  – элемент в  $i$ -ой строке и  $j$ -ой столбце матрицы  $S_k^{-1}$ .

Матрица  $S_k$  имеет вид:

$$S_k = \begin{bmatrix} H \\ HA_{k,k-1} \\ HA_{k+1,k}A_{k,k-1} \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Приведенный измерительный шум имеет вид:

$$v_k^{*i} = \varsigma_{i1} v_1 + \varsigma_{i2} v_2 + \dots + \varsigma_{il} v_l. \quad (12)$$

Дисперсия приведенного измерительного шума имеет вид:

$$r_k^{*i} = M[(v_k^{*i})^2] = [\varsigma_{i1}^2 + \varsigma_{i2}^2 + \dots + \varsigma_{il}^2] r_k, \quad (13)$$

здесь  $r_k = M[v_k^2]$  – дисперсия исходного измерительного шума  $v_k$ .

В системе управления ИИП для оценки параметров измерительных систем используются различные алгоритмы оценивания. Прототипом алгоритма является алгоритм, функционирующий в отсутствии априорной информации о  $Q$ , однако неточное задание  $Q$  приводит к ошибкам  $x$ . Поэтому разработана **модификация адаптивного скалярного фильтра Калмана** используется в качестве алгоритма оценивания, которая имеет вид:

$$\hat{x}_{nk+1}^i = \hat{x}_{nk+1|n(k-1)+1}^i + K_{k+1}^i (z_{k+1}^i - \hat{x}_{nk+1|n(k-1)+1}^i); \quad (14)$$

$$\hat{x}_{nk+1|n(k-1)+1}^i = a_{ii} \hat{x}_{n(k-1)+1}^i + s_k^i; \quad (15)$$

$$p_{k|k-1}^i = a_{ii}^2 p_{k-1}^i + (k_{k-1}^i)^2 (\vartheta_k^i)^2; \quad (16)$$

$$K_k^i = p_{k|k-1}^i / (p_{k|k-1}^i + \hat{r}_k^i); \quad (17)$$

$$p_k^i = (1 - K_k^i) p_{k|k-1}^i; \quad (18)$$

$$\begin{cases} \hat{r}_k^i = (\vartheta_k^i)^2 - p_{k,k-1}^i; (\vartheta_k^i)^2 > p_{k,k-1}^i, \\ \hat{r}_k^i = 0; (\vartheta_k^i)^2 \leq p_{k,k-1}^i, \end{cases} \quad (19)$$

где  $s_k^i = a_{i1} Z_k^1 + a_{i2} Z_k^2 + \dots + a_{in} Z_k^n$ ;  $a_i$  –  $i$ -я строка матрицы  $S^{-1}$ ;  $\vartheta_k^i$  – обновляемая последовательность в адаптивном скалярном алгоритме фильтрации получена по формуле  $\vartheta_k^i = z_k^{*i} - a_{ii} \hat{x}_{k-1}^i - s_{k-1}^i - u_{k-1}^i$ .

В БПММ для прогнозирования погрешностей ИИП сформирована математическая модель на основе проведенных измерений.

**Алгоритм самоорганизации с резервированием трендов** используется в качестве алгоритма построения модели, который имеет вид:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + c_{k-1}, \quad (20)$$

где  $\hat{x}_k$  – прогноз переменной состояния;  $c_{k-1}$  – функция, характеризующая крутизну тренда.

Использование функции, а не коэффициентов, позволяет уточнить характер происходящих изменений. Использовали степенные полиномы и тригонометрические функции.

Нелинейная функция в алгоритме самоорганизации имеет вид:

$$c_{k-1} = \sum_{i=1}^L a_i \mu_i(f_i, x), \quad (21)$$

где  $L$  – количество базисных функций;  $\mu_i$  – базисные функции из набора базисных функций;  $a_i$  – амплитуда базисных функций;  $f_i$  – частота базисных функций.

**В третьей главе** представлена разработанная система управления парковкой с интеллектуальной компонентой, которая включает в себя алгоритм планирования траектории парковки, алгоритм управления парковкой.

Для описания движения автомобиля при парковке обычно используется кинематическая модель, имеющая следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \tan \gamma & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \gamma \end{bmatrix}, \quad (22)$$

где  $\theta$  – угол рыскания автомобиля;  $v$  – скорость автомобиля;  $b$  – расстояние между центрами задней и передней осей;  $\gamma$  – угол поворота рулевого колеса.

Для планирования траектории парковки используется **многоступенчатый нелинейный MPC-регулятор**. По сравнению с обычным MPC-регулятором, многоступенчатый нелинейный MPC-регулятор может обеспечить способ реализации MPC-регулятора с поэтапными показателями качества и ограничениями. Данный регулятор реализуется посредством минимизации суммы показателей качества всех этапов при удовлетворении ограничений всех этапов.

В дискретной форме кинематическая модель автомобиля имеет вид:

$$\tilde{\phi}(k+1) = A\tilde{\phi}(k) + B\tilde{u}(k), \quad (23)$$

где  $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_r T \sin \theta_r \\ 0 & 1 & v_r T \cos \theta_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} T \cos \theta_r & 0 \\ T \sin \theta_r & 0 \\ T \tan \gamma_r / L & v_r T / L \cos^2 \gamma_r \end{bmatrix}$ ,  $T$  – период дискретизации.

Чтобы отразить затраты системы управления парковкой для достижения устойчивого управления, функционал качества определяется следующим образом:

$$\min J(U) = \sum_{k=0}^{N-1} (\tilde{x}(k)^T Q \tilde{x}(k) + \tilde{u}(k)^T R \tilde{u}(k)) + \tilde{x}(N)^T F \tilde{x}(N), \quad (24)$$

где  $U = (u_0, u_1, \dots, u_N)$ ;  $N$  – размер горизонта прогнозирования;  $Q, R, F$  – положительно определенные матрицы.

Приведенный функционал качества  $J(U)$  должен подчиняться ограничениям, в том числе:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\phi}(k+1) = A\tilde{\phi}(k) + B\tilde{u}(k) \\ |\tilde{u}(k)| \leq \tilde{u}_{max} \\ \tilde{x}(0) = \tilde{x}_0 \\ \tilde{x}(p+1) = \tilde{x}_{final} \\ d_{min} \geq d_{safe} \end{array} \right. . \quad (25)$$

Общий решатель нелинейного программирования ищет только локальный минимум, поэтому необходимо обеспечить хорошую априорную информацию для переменных состояния, особенно для задач оптимизации пути. Хорошая априорная информация также уменьшает объем вычислений.

Априорная информация о траектории парковки может быть представлена следующим отрезком:

$$1. \quad y = (x_{c1} - x_0) / (y_{c1} - y_0), \quad (26)$$

$$2. \quad \begin{cases} x_{c2} = x_{c1} + (L / \tan(\delta_c)) \cdot (\sin(\theta_{c2}) + \cos(\theta_{c2} + \Delta\theta)) \\ y_{c2} = y_{c1} - (L / \tan(\delta_c)) \cdot (\cos(\theta_{c2}) + \sin(\theta_{c2} + \Delta\theta)) \end{cases} \quad (27)$$

$$3. \quad \begin{cases} x_f = x_{c2} + L \cdot \cos(\theta_f) \\ y_f = y_{c2} + L \cdot \sin(\theta_f) \end{cases} \quad (28)$$

где  $(x, y)$  – координаты автомобиля;  $\theta$  – угол курса автомобиля;  $L$  – колёсная база автомобиля;  $\delta$  – постоянный угол поворота автомобиля;  $\Delta\theta$  – угол дуги.

**Адаптивный нелинейный MPC-регулятор** применяется для управления движением автомобиля и отслеживания запланированного маршрута для достижения парковки. Это усовершенствованный метод управления, который позволяет обновлять модель системы и ограничения на каждом интервале управления с учётом изменений параметров системы и внешних возмущений.

Пусть есть система в дискретной форме:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_u u(k) + B_v v(k) + B_d d(k) \\ y(k) = Cx(k) + D_v v(k) + D_d d(k) \end{cases}, \quad (29)$$

где  $x$  – вектор состояния;  $u$  – вектор управления;  $v$  – измеренные входные возмущения;  $d$  – неизмеренные входные возмущения;  $y$  – вектор измерений.

Модель объекта можно записать в терминах отклонений от номинальных условий:

$$\begin{cases} x(k+1) = \bar{x} + A(x(k) - \bar{x}) + B(u_t - \bar{u}_t) + \bar{d} \\ y(k) = \bar{y} + C(x(k) - \bar{x}) + D(u_t - \bar{u}_t) \end{cases}, \quad (30)$$

где  $\bar{x}$  – вектор номинального состояния;  $\bar{d}$  – вектор приращения номинального состояния;  $\bar{u}_t$  – вектор номинального входного сигнала;  $\bar{y}$  – вектор номинального выходного сигнала;  $A, B, C, D$  – матрицы параметров, которые необходимо обновить;  $u_t$  – комбинированная входная переменная объекта, включающая переменные  $u, v, d$ .

Адаптивный MPC-регулятор использует фильтр Калмана и корректирует матрицы коэффициентов усиления  $L$  и  $M$  на каждом интервале управления, чтобы поддерживать согласованность с обновленной моделью объекта. Такой фильтр Калмана называется линейно-изменяющимся во времени фильтром Калмана. Структура адаптивного MPC-регулятора представлена на Рис. 2.

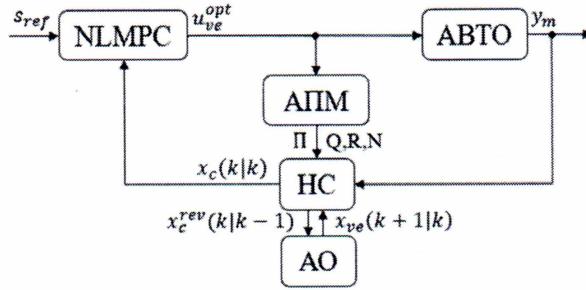


Рис. 2. Структура адаптивного MPC-регулятора

На Рис. 2. введены следующие обозначения: NLMPC – нелинейный MPC-регулятор; АПМ – алгоритм построения модели; НС – наблюдатель состояния; АО – алгоритм оценивания;  $s_{ref}$  – опорная траектория;  $u_{ve}^{opt}$  – оптимальный вход управления автомобиля, полученный с помощью нелинейного MPC-регулятора;  $x_{ve}(k+1|k)$  – оценка состояния автомобиля;  $x_c^{rev}(k|k-1)$  – оценка состояния регулятора;  $y_m$  – текущий выход измерений;  $\Pi$  – совокупность номинальных параметров, включающая  $\bar{x}$ ,  $\bar{D}$ ,  $\bar{u}_t$  и  $\bar{y}$ ;  $Q$ ,  $R$ ,  $N$  – ковариационные матрицы шума, которые могут быть представлены в следующих видах:

$$\begin{aligned} Q &= E\{B\omega\omega^T B^T\} = BB^T \\ R &= E\{D\omega\omega^T D^T\} = DD^T. \\ N &= E\{B\omega\omega^T D^T\} = BD^T \end{aligned} \quad (31)$$

В начале  $k$ -го интервала управления состояние регулятора оценивается с использованием следующих уравнений:

$$x_c^{rev}(k|k-1) = x_c(k|k-1) + B_u \cdot [u_{ve}^{act}(k-1) - u_{ve}^{opt}(k-1)]; \quad (32)$$

$$e(k) = y_m(k) - [C_m \cdot x_c^{rev}(k|k-1) + D_{mv} \cdot v(k)]; \quad (33)$$

$$x_c(k|k) = x_c^{rev}(k|k-1) + M \cdot e(k); \quad (34)$$

$$x_c(k+1|k) = A \cdot x_c^{rev}(k|k-1) + B_u \cdot u_{ve}^{opt}(k) + B_v \cdot v(k) + L \cdot e(k); \quad (35)$$

$$\begin{cases} L(k) = (A(k)P(k|k-1)C(k)^T + N)/(C(k)P(k|k-1)C(k)^T + R); \\ M(k) = P(k|k-1)C(k)^T/(C(k)P(k|k-1)C(k)^T + R) \end{cases} \quad (36)$$

$$P(k+1|k) = A(k)P(k|k-1)A(k)^T - (A(k)P(k|k-1)C(k)^T + N)L(k)^T + Q. \quad (37)$$

В адаптивном MPC-регуляторе используется наблюдатель состояний для оценки вектора неизмеренных состояний, необходимых в качестве основы для прогнозов, а также для прогнозирования влияния предлагаемых регулятором корректировок управляемой переменной на будущие выходные векторы объекта.

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования для проверки работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов.

1. Результаты моделирования разработанных алгоритмов высокоточного позиционирования и картографирования.

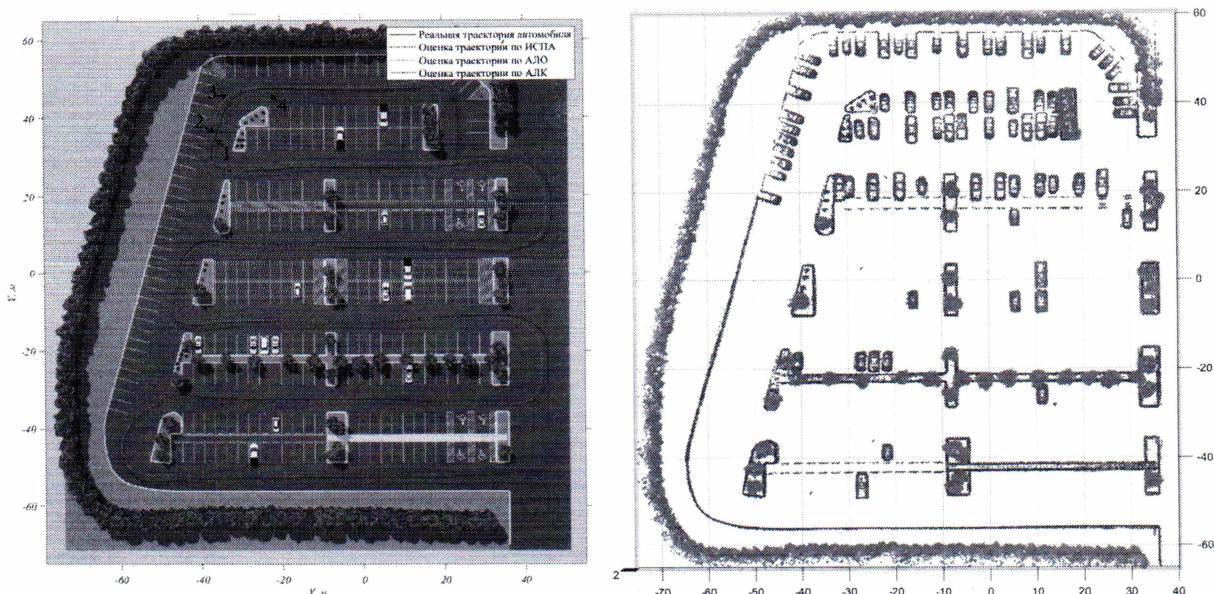


Рис. 3. Позиционирование и картографирования автомобиля на парковке

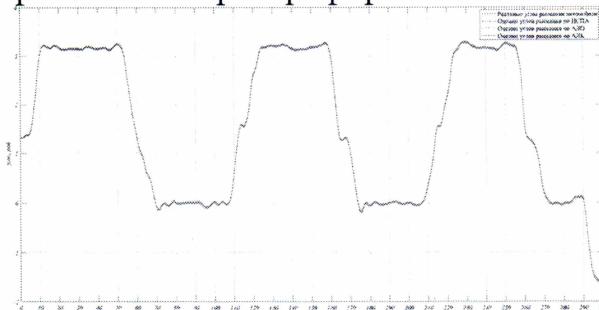


Рис. 4. Траектория углов рыскания автомобиля

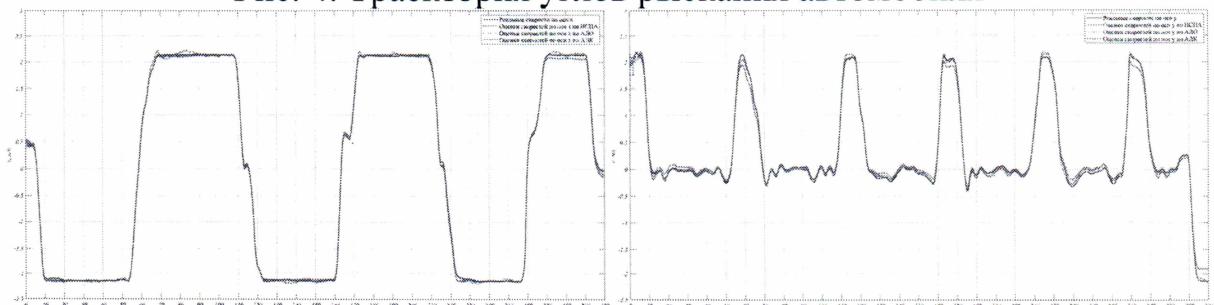


Рис. 5. Траектория скоростей автомобиля по осям  $x$  и  $y$

Из результаты математического моделирования видно, что с помощью использования разработанной системы позиционирования с интеллектуальной компонентой удается повысить точность оценки состояния автомобиля, сократить время расчета и более эффективно подавлять дрейф по оси  $z$  алгоритма позиционирования лидара.

2. Результаты моделирования алгоритма самоорганизации в качестве алгоритма прогноза движения автомобиля. Из Рис. 6 видно, что предложенный алгоритм значительно повышает точность оценок преобразования перемещения по сравнению с обычным алгоритмом лидарной одометрии. На основе этих прогнозируемых значений следует решить, использовать ли алгоритм лидарного картографирования. Алгоритм лидарного картографирования можно применять, когда оценки преобразования перемещения, полученные с использованием алгоритма лидарной одометрии, существенно отличаются от прогнозируемых значений.

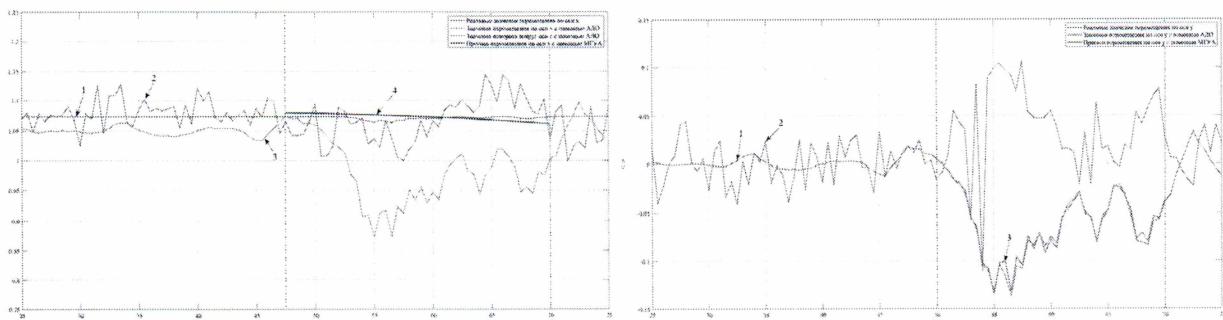


Рис. 6 Прогноз преобразования перемещения автомобиля по оси  $x$  и  $y$

3. Результаты моделирования алгоритма определения препятствий. На Рис. 7 представлена высокоточная карта облака точек парковки, а также определённые транспортные средства и доступные парковочные места вокруг автомобиля. Серые прямоугольники обозначают определённые транспортные средства и препятствий, чёрные прямоугольники – доступные парковочные места.

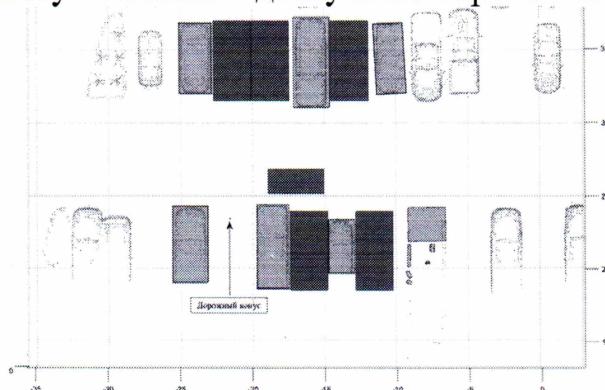


Рис. 7. Определенные транспортные средства и доступные парковочные места

Классический алгоритм  $L$ -образной аппроксимации требуется 1,83 секунд для определенных транспортных средств и парковочных мест, в то время как оптимизированный алгоритм завершает этот процесс всего за 1,6 секунды.

4. Результаты моделирования алгоритма прогнозирования движущихся объектов. На Рис. 8 и 9 представлено сравнение реальной траектории движения с прогнозируемой траекторией движения движущихся автомобиля. Точность траектории прогнозирования достигала 85%. Когда автомобиль готовится к парковке и прогнозирует, что движущееся транспортное средство появится на его траектории парковки, автомобиль приостанавливает управление парковкой. Он ждет, пока движущееся транспортное средство проедет мимо или остановится, прежде чем продолжить выполнение управления парковкой.

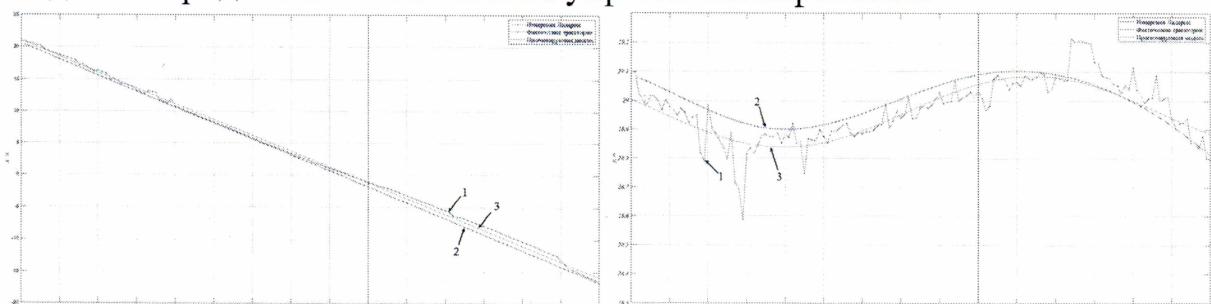


Рис. 8. Траектория движения движущихся автомобиля по оси  $x$  и  $y$

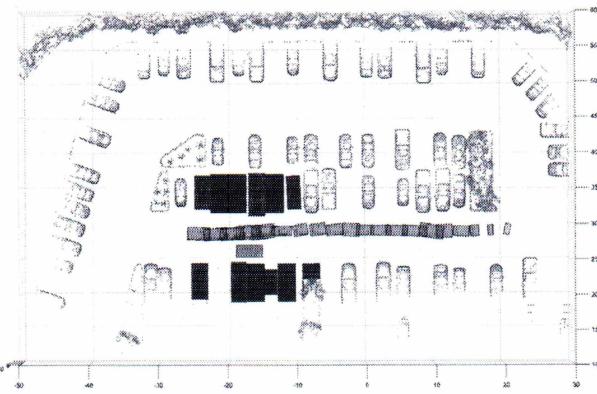


Рис. 9. Траектория движения движущихся автомобиля на карте облака точек

5. Результаты моделирования метода планирования траектории парковки. Достаточная априорная информация о траектории парковки ускоряет поиск подходящего траектории парковки алгоритмом планирования траектории парковки.

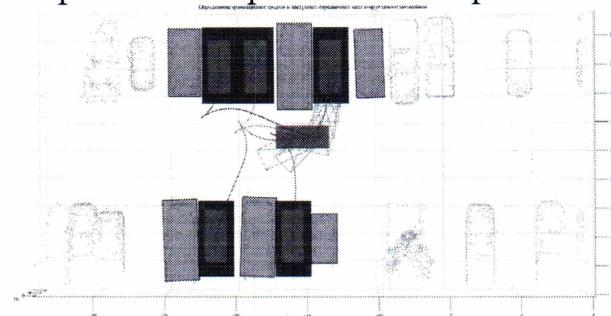


Рис. 10. Запланированные маршруты парковки для доступных парковочных мест

6. Результаты моделирования алгоритма управления парковкой автомобиля. Для сравнения с адаптивным нелинейным MPC-регулятором был выбран Stanley-регулятор для тестирования. Видно, что, поскольку Stanley-регулятор не может регулировать скорость автомобиля, его способность управлять процессом парковки оказывается крайне низкой. В то время как адаптивный MPC-регулятор способен точно контролировать как скорость, так и угол поворота автомобиля, обеспечивая тем самым высокую точность и стабильность парковки.

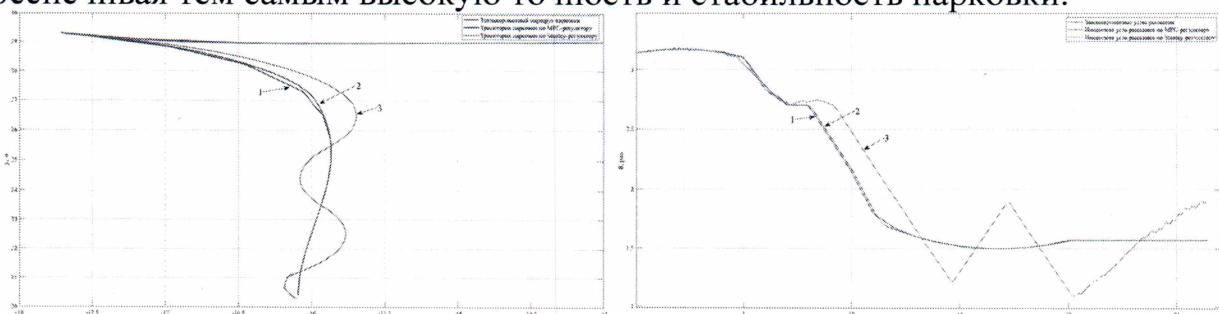


Рис. 11. Траектории движения и изменения угла рыскания по адаптивному MPC-регулятору и Stanley-регулятору

Оптимальные входные параметры управления автомобилем, а именно скорость и угол поворота, показаны на Рис. 12. Из результатов видно, что изменения скорости и угла поворота рулевого колеса при парковке также плавные.

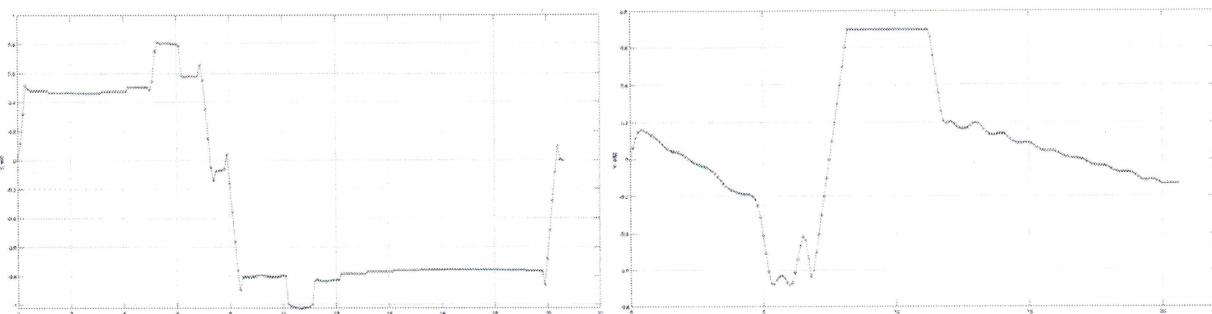


Рис. 12. Изменения скорости и угла поворота автомобиля при парковке

Траектория движения автомобиля при вертикальной парковке с помощью разработанной системы парковки автомобиля представлена на Рис. 13. Видно, что разработанная система позволяет эффективно и безопасно парковать автомобиль на доступных парковочных местах.

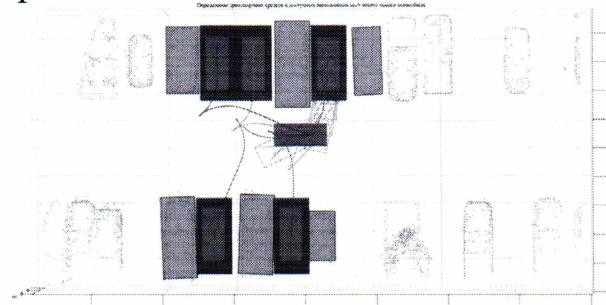


Рис. 13. Траектория движения автомобиля

**В заключении** приведены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан алгоритм позиционирования и картографирования в реальном времени для автомобиля на основе структуры функциональной системы, которая способна изменять рабочий контур в зависимости от различных условий движения автомобиля. В разработанном алгоритме *SLAM* предусмотрена тесная связь лидара и ИИП, что позволяет корректировать искажение движения облака точек и ошибки ИИП соответственно. Кроме того, реализовано выборочное использование алгоритма лидарной одометрии и алгоритма картографирования через анализ угла курса, а скорость вычислений по сравнению с классическим увеличивается в среднем на 10%.
2. Разработан алгоритм адаптивного скалярного ФК для коррекции погрешностей ИИП, способный функционировать в условиях отсутствия достоверной априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов и использующий полный вектор приведенных измерений. Точность оценивания по сравнению с аналогом увеличивается на 10-12%.
3. Разработан метод определения препятствий и прогнозирования действий движущихся объектов по 3D-картам облака точек парковки, основанный на алгоритме *L*-образной аппроксимации и алгоритме самоорганизации с линейным трендом. По сравнению с классическим алгоритмом, представленный метод обладает повышенной точностью и в среднем работает на 5-10% быстрее.

4. Разработана система управления парковкой автомобиля с интеллектуальной компонентой, включающая алгоритм планирования траектории парковки и алгоритм управления парковкой автомобиля, основанные на нелинейном MPC-регуляторе. Данная система способна изменять процесс управления, модель движения автомобиля и ограничения в соответствии с изменениями окружающей среды, а также изменять целевое парковочное место и заново планировать траектории парковки. По сравнению с классическим алгоритмом, разработанная система обладает повышенной точностью отслеживания маршрута и высокой безопасностью.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Цзяньфэн И., Рязанова Н.Ю. Анализ современного состояния развития интеллектуальных систем управления // Будущее Машиностроения России. 2019. С. 829-832. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.).
2. Цзяньфэн И., Селезнёва М.С. Исследование интеллектуальной системы парковки автомобиля // Автоматизация. Современные технологии. 2022. Т. 76, № 5. С. 220-225. (0,7 п.л. / 0,35 п.л.).
3. Цзяньфэн И., Селезнёва М.С. Алгоритм обнаружения препятствий и доступных парковочных мест на основе трехмерной карты облаков точек парковки // Перспективы науки. 2024. Т. 179, № 8. С. 10-15. (0,7 п.л. / 0,35 п.л.).
4. Цзяньфэн И., Селезнёва М.С. Алгоритм оценки местонахождения и ориентации лидара с критерием селекции алгоритмов // Перспективы науки. 2024. Т. 179, № 8. С. 16-20. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.).
5. Управление ориентацией спускаемого аппарата с одинарной подвижной массой / Цзяньфэн И [и др.] // Перспективы науки. 2022. Т. 159, № 12. С. 42-45. (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).
6. Исследование навигационных комплексов с интеллектуальными компонентами / Цзяньфэн И [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 12. С. 3-11. (1 п.л. / 0,2 п.л.).
7. Yi J. The automatic control system for watering indoor plants // Science, Engineering and Business. 2020. P. 177-183. (0,5 п.л.).
8. Research of Intelligent Parking System / J. Yi [et al.] // 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2022. P. 1-4. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).
9. Lidar Odometry and Mapping Optimized by the Theory of Functional Systems in the Parking Lot / J. Yi [et al.] // 2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). 2022. P. 299–303. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.).
10. Application of the Self-Organization Algorithm with the Trend Redundancy in Navigation and Mapping of the Vehicle / J. Yi [et al.] // 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2023. P. 1-4. (0,5 п.л. / 0,12 п.л.).
11. Attitude control of a moving mass-actuated fixed-wing UAV based on LADRC / J. Yi [et al.] // The 13th Asia Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ACMAE). 2022. DOI: 10.1088/1742-6596/2472/1/012045 (0,7 п.л. / 0,2 п.л.).