

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

ЛЕКЦИЯ № 14

Перспективы развития автопилотов электромобилей для повышения безопасности дорожного движения. Машинное зрение с LiDAR и без него

Бельгибаев Бауржан Абдрахимович
Д.т.н., доцент · Кафедра «Искусственный интеллект и big data»
«Технологии в интеллектуальных системах управления в IoT» · 4 курс, бакалавриат

1 Цель лекции

Сформировать системное представление об архитектуре автоматизированного вождения электромобилей, роли машинного зрения и LiDAR, принципах объединения сенсорных данных, принятия решений и обеспечения функциональной безопасности интеллектуальной системы управления.

2 План лекции

1. Эволюция систем помощи водителю и автоматизированного вождения
2. Архитектура интеллектуального автопилота электромобиля
3. Машинное зрение и LiDAR: возможности и ограничения
4. Объединение сенсорных данных и локализация
5. Планирование траектории и управление движением
6. Безопасность, отказоустойчивость и оценка риска
7. Методы экспериментальной проверки и перспективы развития

1 Эволюция интеллектуальных автопилотов

Современный электромобиль является киберфизической системой: измерения датчиков, вычислительные алгоритмы и исполнительные механизмы образуют замкнутый контур управления. В отличие от традиционной системы стабилизации скорости, автоматизированное вождение должно одновременно оценивать обстановку, прогнозировать действия участников движения и формировать безопасную траекторию.

Следует различать системы помощи водителю (ADAS) и автоматизированное вождение. Классификация SAE J3016 выделяет уровни 0–5. Уровень 2 предполагает постоянный надзор водителя; уровень 3 допускает выполнение динамической задачи вождения системой в пределах определённых условий с требованием реагировать на запрос вмешательства; уровни 4–5 характеризуют более широкую автономность, причём уровень 4 ограничен областью проектного применения (ODD). Уровень автоматизации не определяется одним лишь наличием камер или нейросети.

Область проектного применения ODD задаёт дорожные, погодные, скоростные и географические условия, в которых функция должна работать. Для научного сравнения автопилотов необходимо явно фиксировать ODD: город/магистраль, дневное/ночное время, осадки, диапазон скоростей и качество разметки.

2 Функциональная архитектура интеллектуального управления

Типовой вычислительный конвейер включает: сенсоры → синхронизацию и предварительную обработку → восприятие → локализацию → прогнозирование → планирование поведения и траектории → низкоуровневое управление → рулевой привод, тяговый электропривод и тормозную систему. Обратная связь поступает от датчиков состояния автомобиля и внешней среды.

Подсистема восприятия выделяет транспортные средства, пешеходов, разметку, свободное пространство и препятствия. Подсистема прогнозирования оценивает возможные траектории объектов. Планировщик выбирает допустимое действие, учитывая правила дорожного движения и ограничения по динамике. Контроллер преобразует план в команды с учётом текущей скорости, угла поворота колёс и ошибок слежения.

2.1. Уровни вычислительной реализации

Встроенный вычислитель должен обеспечивать ограниченное время ответа. Критически важные функции не должны зависеть от доступности облачного сервиса: IoT-связь целесообразна для телеметрии, диагностики и обновлений, но не как единственный канал экстренного торможения. Сетевая задержка, потеря пакетов и отказ канала рассматриваются как отдельные сценарии риска.

2 Функциональная архитектура интеллектуального управления (продолжение)

Уровень	Основные функции	Требование
Датчики и интерфейсы	Камеры, радары, LiDAR, IMU, GNSS, CAN/Ethernet	Синхронизация и контроль целостности
Edge AI	Детекция, сегментация, трекинг	Предсказуемая задержка вывода
Планирование	Оценка риска, траектория, скорость	Соблюдение ограничений безопасности
Контроллер	Руление, тяга, торможение	Устойчивость и резервирование
IoT/облако	Журналы, аналитика, обновления	Защищённая связь; автономная работа при обрыве

3 Машинное зрение: преимущества и ограничения

Камера обеспечивает богатую семантическую информацию: цвет сигналов светофора, тип дорожного знака, границы полос и жесты участников движения. Алгоритмы OpenCV используются для калибровки, коррекции дисторсии, геометрических преобразований и обработки кадров. Глубокие модели применяются для детекции объектов, семантической сегментации и оценки глубины.

Камера описывается моделью перспективной проекции: $s[u, v, 1]^T = K[R|t][X, Y, Z, 1]^T$, где K — матрица внутренних параметров, R и t — внешние параметры, (X,Y,Z) — координаты точки сцены, (u,v) — координаты пикселя. Без калибровки оценка расстояний и геометрии дорожной сцены может иметь систематическую ошибку.

Ограничения камер включают блики, туман, снег, слабое освещение, засветку и перекрытие объектов. Монокулярная оценка глубины неоднозначна без дополнительных предположений; стереокамеры оценивают расстояние по диспаратности: $Z = fB/d$, где f — фокусное расстояние в пикселях, B — базис стереопары, d — диспаратность. При малом d погрешность расстояния резко возрастает.

5 Объединение сенсорных данных



Рис. 26. Разнородные датчики объединяются для надёжной оценки окружения.

4 LiDAR и сравнение сенсорных конфигураций

LiDAR измеряет расстояние по отражённому лазерному сигналу и формирует облако точек. В упрощённой импульсной модели $R = c\Delta t/2$, где c — скорость света, Δt — время прохождения импульса туда и обратно. Реальные приборы могут использовать различные физические схемы измерения, поэтому формула не описывает все типы LiDAR.

Облака точек позволяют определять геометрию препятствий, строить локальные карты и оценивать положение объектов. Вместе с тем эффективность LiDAR зависит от отражательной способности поверхности, осадков, загрязнения оптики и плотности точек. LiDAR сам по себе не определяет семантику дорожного знака столь же непосредственно, как камера.

4 LiDAR и сравнение сенсорных конфигураций (продолжение)

Конфигурация	Сильные стороны	Ограничения
Камеры	Семантика, разметка, светофоры; сравнительно низкая стоимость	Зависимость от освещения; сложность глубины
Камеры + радар	Семантика и устойчивые измерения дальности/скорости	Сложность ассоциации данных
Камеры + LiDAR	Геометрия сцены и семантика	Цена, вычислительная нагрузка, погодные ограничения
Камеры + радар + LiDAR	Разнообразие измерений и потенциальная избыточность	Стоимость, калибровка, синхронизация и сложность ПО

4 LiDAR и сравнение сенсорных конфигураций (продолжение)

Сравнение архитектур «с LiDAR» и «без LiDAR» нельзя сводить к утверждению об абсолютном превосходстве одной конфигурации. Результат зависит от качества алгоритмов, ODD, аппаратных ограничений, данных обучения и полноты испытаний.

6 Камера и LiDAR

Свойство	Камера	LiDAR
Тип данных	Изображение, цвет, текстура	Облако точек, дальность
Сильная сторона	Семантика: знаки, разметка	Прямое измерение расстояния
Ограничения	Освещённость, блики	Стоимость, погодные помехи
Типичная роль	Классификация объектов	Геометрия и локализация

Таблица. Датчики дополняют друг друга, поэтому применяют их совместно.

5 Объединение сенсорных данных и локализация

Для совмещения камер, LiDAR, радара и IMU необходимы временная синхронизация и пространственная калибровка. Если измерения относятся к разным моментам времени, быстро движущийся объект будет представлен в несовпадающих положениях. Ошибки преобразования координат приводят к ложной ассоциации объектов.

Динамическая модель состояния имеет вид $x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_k$; измерение датчика $z_k = h(x_k) + v_k$. В расширенном фильтре Калмана используются линеаризованные матрицы F_k и H_k, а ковариации Q и R характеризуют неопределённость модели и измерений. Для нелинейных и мультимодальных распределений могут применяться фильтры частиц или факторные графы.

Существуют раннее объединение (на уровне измерений/признаков), промежуточное объединение (внутри нейросети) и позднее объединение (на уровне обнаруженных объектов). Выбор зависит от пропускной способности, калибровки и необходимости объяснять решение системы.

5.1. Оценка неопределённости

Если измерения независимы и гауссовы, при объединении двух скалярных оценок с дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 результирующая дисперсия равна $\sigma^2 = (1/\sigma_1^2 + 1/\sigma_2^2)^{-1}$. Это справедливо при корректной модели независимости; коррелированные ошибки требуют учёта межсенсорной ковариации.

6 Планирование и управление движением электромобиля

Планировщик поведения решает, следует ли удерживать полосу, замедляться, останавливаться или перестраиваться. Планировщик траектории формирует последовательность положений и скоростей с учётом препятствий и динамических ограничений. В инженерных системах применяются решётчатые планировщики, оптимизационные методы, MPC и алгоритмы поиска по графу.

Упрощённая кинематическая велосипедная модель: $\dot{x} = v\cos\psi$; $\dot{y} = v\sin\psi$; $\dot{\psi} = (v/L)\tan\delta$; $\dot{v} = a$, где L — колёсная база, δ — угол поворота управляемых колёс, ψ — курс, a — продольное ускорение. Модель подходит для умеренных скоростей и малых боковых скольжений, но не заменяет полную динамическую модель при предельных манёврах.

Функция качества для MPC может иметь вид $J = \Sigma_k [q_e e_{y,k}^2 + q\psi e\psi,_k^2 + q_v(v_k - vref,_k)^2 + r\delta\Delta\delta_k^2 + ra\, a_k^2]$. Ограничения включают $|\delta| \le \delta max$, $|a| \le amax$, минимальные дистанции до препятствий и границы проезжей части. В реальном автопилоте оптимизация должна выполняться в установленный вычислительный бюджет.

Планирование и управление движением электромобиля (продолжение)

6.1. Оценка безопасной дистанции

Упрощённая оценка остановочного пути: $d_{stop} = v\tau + v^2/(2a_{br})$, где τ — суммарная задержка восприятия и реакции, $a_{br} > 0$ — доступное среднее замедление. При $v = 15$ м/с, $\tau = 0{,}30$ с и $a_{br} = 5$ м/с² получаем $d_{stop} = 4{,}5 + 22{,}5 = 27$ м. Это иллюстративный расчёт: в эксплуатации необходим запас на неопределённость сцепления, уклон, действия других участников и ошибки измерений.

7 Безопасность, отказоустойчивость и киберзащита

Безопасность автоматизированного вождения охватывает функциональную безопасность при отказах оборудования, безопасность предполагаемой функциональности при ограничениях восприятия и сценариях без явной неисправности, а также кибербезопасность подключённых компонентов. В учебном анализе полезно различать ISO 26262, ISO 21448 (SOTIF) и ISO/SAE 21434; применение конкретных требований зависит от системы и нормативного контекста.

Для каждого опасного события формируют сценарий, определяют его причины, способы обнаружения и минимально рискованное действие. Примеры: загрязнение камеры, потеря LiDAR, рассогласование времени датчиков, ложная разметка, недоступность GNSS, зависание вычислительного блока, потеря CAN-сообщений. Безопасная деградация может означать снижение скорости, запрет манёвра или контролируемую остановку — в зависимости от ODD и проектных требований.

Подключение к IoT-инфраструктуре требует аутентификации устройств, шифрования каналов, защищённой загрузки, контроля версий программного обеспечения и журналирования событий. Обновления моделей машинного обучения должны проходить регрессионное тестирование, поскольку повышение средней точности не гарантирует безопасность на редких сценариях.

8 Методика экспериментального исследования

Сравнительное исследование конфигураций «камера», «камера + радар» и «камера + LiDAR» целесообразно выполнять на одинаковых дорожных сценариях и вычислительных ограничениях. Необходимо фиксировать условия освещения, погодные факторы, плотность трафика, качество разметки и скорость автомобиля. Данные для обучения не должны пересекаться с тестовыми поездками на уровне почти идентичных кадров.

8 Методика экспериментального исследования (продолжение)

Показатель	Обозначение	Интерпретация
Точность детекции	mAP	Качество распознавания объектов при заданном протоколе
Пропускная способность	FPS	Число обработанных кадров в секунду
Задержка контура	T_total	Восприятие + планирование + управление
Ошибка локализации	ATE RMSE	Отклонение оценённой траектории от эталона
Ошибка удержания полосы	RMSE(e_y)	Среднеквадратичная боковая ошибка
Опасные сближения	N_near	Количество событий по заранее заданному порогу

8 Методика экспериментального исследования (продолжение)

Показатель	Обозначение	Интерпретация
Потребление энергии	P_avg	Средняя мощность вычислительного узла

8 Методика экспериментального исследования (продолжение)

Для воспроизводимости задают не менее нескольких независимых прогонов на сценарий, доверительные интервалы для ключевых метрик и протокол регистрации ошибок. Вывод о превосходстве архитектуры должен опираться не только на среднее значение mAP, но и на распределение задержек, редкие ошибки и выполнение требований безопасности.

8.1. Учебный пример сравнения задержек

Предположим, что обработка камеры занимает 35 мс, оценка сцены — 25 мс, планирование — 18 мс, формирование команды — 7 мс. Тогда последовательная суммарная задержка составляет 85 мс, что соответствует теоретическому пределу около 11,8 циклов/с без учёта буферизации и параллелизма. При добавлении LiDAR нужно оценивать не только время обработки облака точек, но и время ожидания синхронизированного измерения. Приведённые значения условные, а не результаты испытаний конкретного оборудования.

9 Перспективы развития

К перспективным направлениям относятся многомодальные модели восприятия, совместное обучение геометрических и семантических представлений, оценка неопределённости нейросетей, аппаратное ускорение Edge AI и обучение на сложных симуляционных сценариях. При этом рост вычислительной мощности сам по себе не решает проблему подтверждения безопасности.

Важным направлением остаётся взаимодействие электромобиля с инфраструктурой (V2X). Сообщения от дорожных объектов могут расширять ситуационную осведомлённость, но не должны некритично заменять локальные измерения: необходимо учитывать подлинность, задержку и доступность внешних данных.

12 Заключение

Интеллектуальный автопилот электромобиля представляет собой многокомпонентную систему управления, в которой безопасность зависит от согласованной работы восприятия, локализации, прогнозирования, планирования и исполнительных механизмов. Камеры и LiDAR предоставляют взаимодополняющие данные, однако выбор архитектуры требует экспериментального подтверждения в определённой области эксплуатации. Ключевыми критериями являются не только точность нейросети, но и задержка контура, устойчивость к отказам, предсказуемость поведения и полнота испытаний.

13 Контрольные вопросы

1. Чем отличаются ADAS и автоматизированное вождение?
2. Что понимают под ODD и почему её необходимо указывать?
3. Какие блоки входят в архитектуру интеллектуального автопилота?
4. Какие преимущества имеет камера для восприятия дорожной сцены?
5. Какие ограничения характерны для монокулярной оценки глубины?
6. Как определяется дальность в импульсном LiDAR?
7. Почему нельзя утверждать, что LiDAR всегда необходим или всегда избыточен?
8. Для чего нужна пространственно-временная калибровка датчиков?
9. В чём различие раннего и позднего объединения сенсорных данных?
10. Как используются EKF и ковариации измерений при локализации?
11. Какие параметры входят в кинематическую велосипедную модель?

13 Контрольные вопросы (продолжение)

12. Как формируется целевая функция MPC для удержания полосы?
13. От каких факторов зависит остановочный путь электромобиля?
14. Чем различаются функциональная безопасность, SOTIF и кибербезопасность?
15. Какие показатели необходимы для сравнительного исследования автопилотов?

Рекомендуемая литература и нормативные материалы

- **SAE International. SAE J3016:** Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles.
- **ISO 26262. Road vehicles —** Functional safety.
- **ISO 21448. Road vehicles —** Safety of the intended functionality.
- **ISO/SAE 21434. Road vehicles —** Cybersecurity engineering.
- Thrun S., Burgard W., Fox D. Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005.
- Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control. Springer, 2nd ed., 2012.
- **OpenCV Documentation:** https://docs.opencv.org/
- **NVIDIA DRIVE Developer Documentation:** https://developer.nvidia.com/drive