

## Роль HD-карт в беспилотном транспорте\*

А.И. Гайош<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
alexander.gaiosh@gmail.com

**Аннотация.** В этой статье рассматриваются возможности применения картографических решений в автономном вождении. Приводится описание и сравнение форматов OpenDRIVE и Lanelet, приводится описание использования карт в системах восприятия, локализации и планирования движения автономного транспортного средства, а также приводится концепция цифровой модели дороги.

**Ключевые слова:** автономный транспорт, HD-карты, навигация, моделирование дорожно-транспортных сетей, восстановление дороги

### 1 Введение

Высокоавтоматизированные транспортные средства (ВТС) разрабатываются с целью снижения влияния человеческого фактора на дорожный трафик и повышение безопасности на дорогах. Первые попытки создания ВТС проводились ещё в 80-ых годах 20-го века. В период с 1987 по 1995 год в Европе проводился проект Eureka PROMETHEUS [1], являющийся первым крупным исследованием в области автоматизированного вождения. Опираясь на результаты исследований, компания Daimler-Benz разработала автомобиль VITA II [2], в котором была представлена первая система адаптивного круиз-контроля.

Во время DARPA Urban Challenge [3], состоявшегося в 2007 году, многие исследовательские группы со всего мира получили возможность опробовать свои решения в тестовой среде, смоделированной в виде городского трафика. Это соревнование позволило привлечь общественный интерес к сфере беспилотного транспорта. Разработанные решения требовали внедрения и дальнейших исследований. Однако, для выхода систем автономного вождения на рынок требовалось расширение набора используемых технологий как в автомобилях, так и в дорожной инфраструктуре.

Одним из ключевых механизмов автономного вождения, позволяющим связать транспортное средство с окружающей средой, стало использование карт высокого разрешения (HD-карты). Применение этой технологии охватывает три основные проблемы автономного вождения. Первая проблема - способность транспортного средства определять свое местоположение и местоположение

---

\* Публикация выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-07-00844

других объектов с высокой точностью по отношению к окружающей среде. Вторая - реакция на события, возникающие как на пути движения беспилотного автомобиля, так и вне зоны видимости бортовых датчиков. Третья – построение маршрута и маневрирование с соблюдением правил дорожного движения [4].

В данной статье приводится обзор того, какую роль играют HD-карты в архитектуре автономного автомобиля, и почему для беспилотного вождения вообще требуются специальные карты. Статья организована следующим образом: часть II раскрывает понятие цифровой модели дороги, описывает, какую информацию должна включать HD-карта, содержит описание и сравнение форматов хранения HD-карт; часть III рассказывает как HD-карты влияют на системы восприятия, планирования движения и локализации транспортного средства в пространстве; в заключении приводятся выводы, а также выделяются актуальные направления исследовательских работ в сфере HD-картографии.

## 2 Форматы представления HD-карт

Применение географических информационных систем (ГИС) решает задачи поиска оптимального маршрута и отслеживания движения по нему. Однако, точность этих карт находится в метровом диапазоне, тогда как беспилотники требуют точности в 5-10 сантиметров, поэтому обеспечивающие такую точность карты и называются картами высокого разрешения (англ. High Definition Maps, HD-Maps). Помимо этого, ГИС не предоставляют полной информации о дорожной сети, которая требуется для движения автономного автомобиля. Вся эта информация объединяется под общим понятием – цифровая модель дороги. Эта сущность содержит внутри себя описание геометрии дороги, количество полос и их границы, логическую связь полос между собой, дорожную разметку и скоростные ограничения, дорожные знаки и их привязку к полосам движения, светофоры, стоп-линии и пешеходные переходы. Существует несколько принципиально разных форматов представления и хранения HD-карт. Текущий раздел посвящен обзору и сравнению этих форматов.

### 2.1 Формат OpenDRIVE

Формат хранит данные в виде XML документа [5]. Дорожное пространство рассчитывается на основе эталонной кривой, которая описывает геометрию всего пространства на заданном участке дороги. Полосы движения генерируются путем построения кривых Безье на определенном расстоянии от эталонной кривой. Каждая кривая имеет собственный номер от 1 до N для полос в направлении движения и от -1 до -N на встречном движении, где N – количество полос на текущем участке дороги. Данный формат нашел широкое применение в различных симуляторах и средах моделирования дорожного трафика [6], где не требуется сантиметровая точность и абсолютное соответствие геометрии дорожного пространства.

## 2.2 Формат lanelet

Lanelet – формат, в котором дорожная сеть представляется в виде логически связанных друг с другом участков конечной длины – полос [7]. Полосы ограничены двумя кривыми, для каждой из которых явно указывается её назначение – правый или левый край. Границы представлены конечным множеством точек, каждая из которых описывается координатами трехмерного пространства. Каждая полоса хранит в себе метаинформацию о логической связи с другими полосами, а также об объектах, привязанных к данной полосе, например, дорожных знаках или пешеходных переходах. Наличие связей между полосами и ориентация границ позволяет построить ориентированный граф дорожно-транспортной сети, на основе которого можно генерировать множество траекторий для маневрирования внутри полосы. Данный формат нашел широкое применение в различных научных проектах, таких, как Autoware [8].

## 2.3 Анализ и сравнение форматов хранения HD-карт

Отличительной чертой формата OpenDRIVE является то, что благодаря кривым Безье кривизна границ дороги равномерна на всем участке дороги, что обеспечивает генерацию плавной траектории. Однако, далеко не всегда полосы имеют одинаковую ширину на протяжении всего участка дороги, что требует дробления эталонной кривой на большое количество сегментов. Кроме того, этот формат спроектирован исключительно для хранения HD-карт, он не предусматривает возможности внесения изменений в карты и не предоставляет никакого функционала для этого. Таким образом, каждый проект, разрабатывающий HD-карты в формате OpenDRIVE самостоятельно реализует инструментарий для создания карт и их редактирования. Также, зачастую многие проекты берут этот формат за основу и модифицируют под собственные задачи. Следствием этого является большое количество неунифицированных закрытых форматов, которые несовместимы друг с другом.

Один из самых крупных и известных проектов в области автономного вождения, создавших свой формат хранения карт на базе OpenDRIVE является Apollo [8]. Проект также обеспечил совместимость собственного формата со стандартным OpenDRIVE. Также существует инструмент, позволяющий конвертировать карты OpenStreetMap в OpenDRIVE [9]. Применение таких карт ограничивается средами симуляции, когда решающим фактором является возможность быстро сгенерировать карту на основе открытых источников для запуска симуляции, а требованиями к точности и соответствия геометрии можно пренебречь.

Альтернатива OpenDRIVE - формат Lanelet, набирающий все большую популярность. Самая распространённая реализация этого формата – библиотека Lanelet2 [10]. Она содержит как описание самого формата, так и предоставляет API на языках C++ и Python для работы с картами. Помимо этого, представление данных основывается на формате OpenStreetMap, что обеспечивает интеграцию с инструментом для создания и редактирования карт JOSM [11].

Формат Lanelet удобен как на этапе релиза, когда карты эксплуатируются, так и на этапе разработки, когда постоянно требуется добавлять в карты новые элементы и редактировать существующие. Границы полос, выполненные в виде множества точек, позволяют гибко и просто очерчивать и изменять геометрию пространства и местоположение элементов дорожной инфраструктуры. Это гарантирует точное соответствие геометрии дорожного пространства карты с реальной дорожной разметкой, благодаря чему отпадает необходимость в дополнительной верификации генерируемых маршрутов. Однако, к его недостаткам, можно отнести отсутствие решений для автоматизации создания карт. Сейчас все карты создаются вручную, что занимает гораздо больше времени, чем генерация карт на базе открытых ГИС.

### 3 HD-карты в автономном транспорте

#### 3.1 HD-карты и система локализации

Ключевым компонентом в автономном автомобиле является система локализации. Автомобилю недостаточно знать свое абсолютное местоположение и ориентацию, ему также необходима информация об окружающих его объектах, таких как границы дороги или пешеходные переходы. Эту информацию можно получить из карты, определив свое местоположение в ней.

Самый распространенный подход для получения абсолютного местоположения – использование GNSS приёмников, которые позволяют получать местоположение автомобиля со спутников, затем следует поиск ближайшей точки в карте к полученным со спутника координатам, тем самым автомобиль определяет свое местоположение в карте. Этот подход широко используется в современных навигационных системах и дорожных информационных сервисах. Однако, получаемая точность недостаточна для движения автономных автомобилей в городе, поскольку в лучшем случае GNSS достигает метровой точности, в то время как автономное вождение требует точности определения местоположения до 5-10 сантиметров. В таком случае используют технологию RTK-поправок [12], которые позволяют достичь требуемой точности. Однако, в чистом виде GNSS RTK плохо подходит для движения в городских условиях из-за большого количества зон, где сигнал не может быть принят, например, в тоннеле или при движении в условиях плотной застройки.

Альтернативным способом локализации является применение алгоритмов одновременной локализации и картирования (SLAM) [13]. Проецирование собранных в реальном времени данных с бортовых датчиков на HD-карту позволяет точно определить местоположение автомобиля как в карте, так и по отношению к другим участникам дорожного движения. Недостатком являются крайне высокие требования к вычислительной мощности и каналу передачи данных.

Независимо от того, какой метод применяется, использование HD-карт позволяет определить местоположение автомобиля в пространстве и получить из

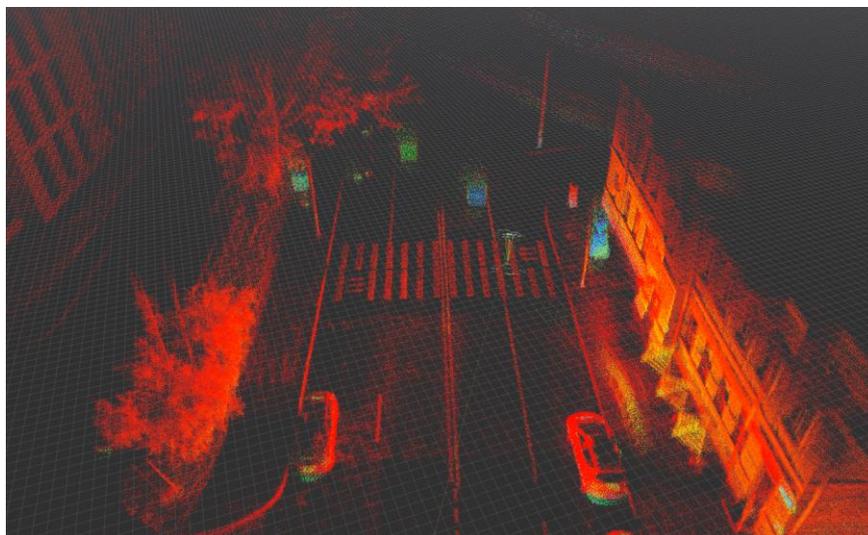
карты весь доступный контекст об окружающей обстановке. Этот контекст в свою очередь используют система планирования маршрута и система восприятия.

### 3.2 HD-карты и система восприятия

Автономный автомобиль должен уметь обнаруживать и объезжать препятствия, причем делать это в соответствии с правилами дорожного движения. В дополнение к неподвижным препятствиям на дорогах находятся и движущиеся объекты, такие как автомобили, пешеходы и велосипедисты. За решение подобных задач в беспилотном автомобиле отвечает система восприятия. Полученные объекты она проецирует на HD-карту, чтобы объекты и препятствия учитывались при планировании движения. Как правило, система восприятия состоит из набора разнообразных датчиков и механизмов обработки, сегментации и классификации информации, полученной от них.

Сенсорика автономного автомобиля достаточно разнообразна, она включает в себя целый ряд датчиков, таких как радары, лидары, камеры, средства инерциальной навигации. Каждый датчик имеет свои ограничения по эксплуатационным условиям и области видимости. Поэтому набор датчиков подбирают из задач и условий эксплуатации ВТС так, чтобы недостатки одних датчиков компенсировались преимуществами других. Многие крупные проекты, такие как Waymo [14] и HERE [15], конфигурируют специальные картографические автомобили, задача которых - сбор данные с разных локаций. Такие автомобили, как правило, укомплектовываются несколькими лидарами с круговым обзором, камерами и GNSS-приемником для получения абсолютных координат. Подобный набор датчиков позволяет получить плотное облако точек сантиметровой точности, в котором содержатся все необходимые данные для создания карты, пример такого облака точек можно увидеть на рис.1. В облаке отчетливо видны границы дороги, линии разметки, припаркованные автомобили, пешеходный переход и дорожные знаки.

В облаке точек сперва выделяются края дороги и границы полос. Это позволяет обрисовать основную геометрию дорожного пространства с точной привязкой к реальному расположению объектов. Эта геометрия ограничивает пространство, в котором автомобиль может двигаться. Дальше границы полос в облаке точек аннотируются как линии разметки. Линии разметки определяют возможность перестроения и маневрирования внутри очерченной геометрии. Кроме того, в облаке точек выделяется расположение элементов дорожной инфраструктуры - дорожных знаков, стоп-линий, пешеходных переходов, светофоров, парковочных мест.



**Рис. 4.** Сырое облако точек, содержащее в себе информацию о дорожной инфраструктуре

Разметка данных зачастую происходит в ручном режиме. Также существует конвейер, позволяющий при помощи методов глубокого обучения восстанавливать из облака точек дорожно-транспортную сеть [16], однако его результаты требуют дополнительной верификации, потому что часто возникают ошибки при привязке светофоров к полосе движения, из-за чего автомобиль может получить ошибочную информацию и выполнить некорректный маневр.

### 3.3 HD-карты и система планирования движения

Для автономного движения автомобиль должен самостоятельно уметь планировать маршрут. Использование HD-карт позволяет формировать граф пространства с точной привязкой к абсолютным координатам для поиска глобального маршрута. Также это позволяет рассчитать локальный маршрут фиксированной длины для фильтрации объектов и генерации траекторий маневрирования внутри полосы, что планировщики на базе ГИС делать не позволяют.

Планировщик глобального маршрута располагает всей информацией о геометрии дороги и ее разметке. Для сформированного глобального маршрута генерируется набор возможных траекторий движения с учетом разметки и границ полос. Каждая траектория представляет собой набор последовательных точек с фиксированным шагом, содержащих информацию о позиции и ориентации транспортного средства, а также содержит метаинформацию об элементах дорожной инфраструктуры. Таким образом, используя HD-карты, система планирования может находить маршрут и траектории маневров с привязкой к реальной геометрии дороги и расположению автомобиля в полосе.

### 3.4 Предсказание траекторий объектов на основе HD-карт

Значительным преимуществом использования HD-карт в автономном вождении является возможность предсказать поведение других участников дорожного движения. Пример работы системы предсказания представлен на рис. 2. Исходя из траекторий, которые извлекаются из цифровой модели дороги, можно сгенерировать все возможные траектории движения любого объекта, который способна детектировать система восприятия автомобиля, и отображать эти траектории на HD-карту для поиска коллизий с траекторией беспилотного автомобиля с траекторией беспилотного автомобиля [17]. Это значительно упрощает процесс перестроений между полосами, а также позволяет избегать столкновений с другими транспортными средствами.

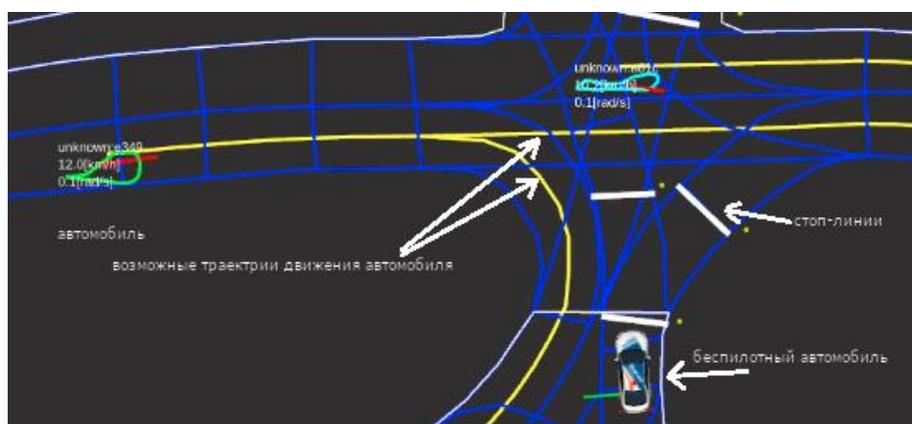


Рис 5. Визуализация возможных траекторий движения обнаруженных автомобилей

## 4 Заключение

Максимальный уровень автономности автомобиля — полностью автоматизированное вождение в любых условиях окружающей среды, без вмешательства человека, на данный момент времени не достигнут. Это связано с большим количеством проблем, особенно в городских условиях: высокая плотность движения, строгие требованиями к реальному времени, разнообразие участников дорожного движения, при отсутствии гарантии соблюдения правил дорожного движения этими участниками.

Использование HD-карт позволяет упростить программное обеспечение, а также позволяет выгружать из карт различную информацию о дорожно-транспортной сети для ее использования в узлах системы управления. Это позволяет автомобилю определять свое местоположение по отношению к другим объектам, генерировать оптимальные маршруты с учетом актуальной дорожной обстановки, выполнять маневры с учетом траекторий движения других транспортных средств.

Актуальными инженерными и научными проблемами в HD-картографии на сегодняшний день являются: унификация формата HD-карт; автоматизация сбора данных; автоматизации построения карт; разработка новых алгоритмов и методов построения маршрута, которые будут учитывать геометрию дороги и габариты транспортного средства.

Существующие форматы хранения HD-карт предоставляют разные возможности и их применение отличается. OpenDRIVE широко используется в средах моделирования, где важна скорость создания карт, а их точностью можно пренебречь, однако практически не предоставляет инструментов для работы с картами, кроме того на базе данного формата создается множество закрытых форматов, использующихся в различных проектах, но они несовместимы друг с другом. Lanelet набирает популярность в исследовательских проектах для создания карт, используемых при автономном движении, где важна точность, предоставляет различные инструменты для создания и обработки карт, однако не имеет средств автоматической генерации карт, из-за чего создание карт требует времени и проверок на ошибки, вызванные человеческим фактором. Выбирать формат следует, исходя из целей и области применения создаваемых карт.

## Литература

1. Williams, M.: PROMETHEUS-The European research program for optimizing the road transport system in Europe. IEE Colloquium on Driver Information, London, UK, 1988, pp. 1/1-1/9.
2. Ulmer, B.: Vita ii-active collision avoidance in real traffic. Intelligent Vehicles' 94 Symposium, Proceedings of the. IEEE, 1994, pp. 1–6.
3. The darpa urban challenge: autonomous vehicles in city traffic, vol. 56, 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9783642039904>
4. Redzic, O., Rabel, D.: A location cloud for highly automated driving. In: Meyer G, Beiker S, editors Road vehicle automation 2. Switzerland: Springer International Publishing; 2015. p. 49–60
5. Detailed Specification – OpenDRIVE, <http://www.opendrive.org/docs/OpenDRIVEFormatSpecRev1.4H.pdf>. Last accessed 14 Jul 2020
6. Eclipse SUMO - Simulation of Urban MObility, <https://www.eclipse.org/sumo/>. Last accessed 14 Jul 2020
7. Bender, P., Ziegler J., Stiller, C.: Lanelets: Efficient map representation for autonomous driving. in Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2014, pp. 420–425.
8. Raju, V., Gupta, V., Lomate, S.: Performance of Open Autonomous Vehicle Platforms: Autoware and Apollo. 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Bombay, India, 2019, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/I2CT45611.2019.9033734>.
9. Althoff, M., Urban, S., Koschi, M.: Automatic Conversion of Road Networks from OpenDRIVE to Lanelets. 2018 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), Singapore, 2018, pp. 157-162, <https://doi.org/10.1109/SOLI.2018.8476801>

10. F. Poggenshans, F.: Lanelet2: A high-definition map framework for the future of automated driving. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui, HI, 2018, pp. 1672-1679. <https://doi.org:10.1109/ITSC.2018.8569929>
11. JOSM Homepage, <https://josm.openstreetmap.de>. Last accessed 14 Jul 2020
12. Dabove, P., Di Pietra, V.: Single-baseline RTK positioning using dual-frequency GNSS receivers inside smartphones. *Sensors*, 19(19), 4302 (2019).
13. Huang, B., Zhao, J., Liu, J.: A Survey of Simultaneous Localization and Mapping. arXiv preprint arXiv:1909.05214 (2019).
14. Bansal, M., Krizhevsky, A., & Ogale, A.: Chauffeurnet: Learning to drive by imitating the best and synthesizing the worst. arXiv preprint arXiv:1812.03079 (2018).
15. HD Maps for Autonomous Driving and Driver Assistance | HERE, <https://www.here.com/platform/automotive-services/hd-maps>. Last accessed 14 Jul 2020
16. Elhousni, M., Lyu, Y., Zhang, Z., & Huang, X.: Automatic Building and Labeling of HD Maps with Deep Learning. arXiv preprint arXiv:2006.00644 (2020).
17. Marks, P.: Quantum positioning system steps in when GPS fails. *New Scientist*, 222, 19 (2014).