

# Оптимизация траектории движения транспортных средств в задаче управления транспортными потоками на перекрестке

А.С. Юмаганов

Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

yumagan@gmail.com

А.А. Агафонов

Самарский национальный исследовательский университет  
им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

ant.agafonov@gmail.com

**Аннотация**—В работе представлен метод формирования оптимальной траектории движения транспортных средств на контролируемом перекрестке. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанного метода в среде симуляции SUMO.

**Ключевые слова**— интеллектуальные транспортные системы, траектория движения, управление транспортным средством.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается неуклонный рост количества транспортных средств на дорогах. Это приводит к существенной нагрузке на транспортную инфраструктуру городов, которая выражается в увеличении числа "пробок" на дорогах, загрязнении окружающей среды, увеличении числа транспортных происшествий. Для снижения нагрузки на транспортную сеть города применяются различные методы управления движением транспортных средств на перекрестках. Выделяют несколько подходов для решения задачи эффективного управления дорожным трафиком на перекрестках.

Первый подход основан непосредственно на управлении сигналами светофора. Методы основанные на классических подходах управления сигналами светофоров [1, 2] используются для управления одним изолированным перекрестком. В последнее время в связи с увеличением числа различного рода датчиков, устанавливаемых на транспортные средства (ТС) и элементы дорожной инфраструктуры, достаточно большое развитие получили методы на основе машинного обучения [3], которые позволяют управлять в том числе и несколькими перекрестками.

С появлением подключенных транспортных средств (connected and automated vehicles, CAV) получили развитие методы эффективного управления дорожным трафиком на перекрестках, основанные на оптимизации траекторий движения ТС [4, 5]. В рамках данной группы методов для каждого ТС в процессе прохождения перекрестка формируется оптимальная траектория движения, полученная с учетом информации о ближайших ТС и объектах транспортной инфраструктуры. В качестве критерия оптимизации обычно используются следующие: потребление топлива, время ожидания, время прохождения перекрестка и т.д. В данной работе представлен метод формирования оптимальной траектории движения транспортных средств на контролируемом перекрестке.

Представленный в данной работе метод является модификацией метода [4], в основе которого лежит Shooting Heuristic алгоритм.

## 2. SHOOTING HEURISTIC АЛГОРИТМ

В рамках представленного в работе [4] метода, формирование траекторий движения транспортных средств осуществляется следующим образом. На первом этапе формируется исходная траектория движения с параметрами  $(\bar{a}^f, \underline{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v)$ , которая затем подается на вход разработанного авторами алгоритма оптимизации с заданной целевой функцией. В процессе работы алгоритма параметры  $(\bar{a}^f, \underline{a}^f, \bar{a}^b, \underline{a}^b, v)$  определенным образом обновляются до тех пор, пока полученная на их основе траектория не будет являться оптимальной.

Для формирования траектории движения ТС используется Shooting Heuristic алгоритм. В рамках данного алгоритма для всех транспортных средств, въезжающих на заданный перекресток формируется вектор, содержащий начальное местоположение ТС, его скорость и время. Shooting Heuristic алгоритм построит физически возможную траекторию от начального местоположения ТС до перекрестка с предварительно определенным набором параметров, включающим ускорение и ограничение скорости.

Shooting Heuristic алгоритм содержит два основных процесса: forward shooting (FSP) и backward shooting (BSP). В ходе FSP для рассматриваемого транспортного средства с некоторым начальным состоянием формируется траектория, при движении по которой ТС разгоняется до скорости  $v$  с заданным ускорением  $\bar{a}^f$ . Если полученная траектория не пересекает траекторию впереди идущего ТС и находится на безопасном расстоянии от него, то FSP вернет безопасную траекторию. Если же полученная траектория не является безопасной, то FSP вернет траекторию, являющуюся результатом её плавного слияния с так называемой "теневой" траекторией впереди идущего транспортного средства. В процессе слияния двух траекторий используется отрицательное ускорение  $\underline{a}^f$ .

Если полученная в ходе процесса FSP траектория пересекает перекресток на красный сигнал светофора, то для данной траектории запускается BSP процесс. В результате процесса BSP участок траектории содержащий выход на перекресток смещается к началу следующей зеленой фазы, строится траектория

полученная путем плавного слияния смещенного участка и исходной траектории. В процессе построения такой траектории используется ускорение  $\bar{a}^b$  и отрицательное ускорение  $\underline{a}^b$ . Полученная траектория является результатом работы Shooting Heuristic алгоритма для рассматриваемого ТС.

Таким образом Shooting Heuristic алгоритм последовательно формирует траектории для каждого ТС на дорожной полосе.

### 3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Представленный в работе [4] метод формирования траектории движения ТС был предназначен для однопольного перекрестка и не учитывал возможные перестроения ТС. В данной работе представлена модификация метода [4], которая позволяет применять данный метод для многополосных дорог. Перестроения могут возникнуть после пересечения ТС текущего перекрестка, в том случае, если на следующем по ходу движения смежном перекрестке ТС необходимо проехать по полосе движения отличной от той, на которую ТС въехало с текущего перекрестка.

В рамках разработанной модификации для каждой дорожной полосы формируется набор траекторий ТС, находящихся на соответствующей полосе. В случае перестроения, в результате которого на одной из дорожных полос появилось / пропало ТС выполняется следующее.

- 1) Если на дорожной полосе появилось новое транспортное средство, то для него строится траектория с учетом «теневого» траектории ближайшего впереди идущего ТС.
- 2) Для всех ТС расположенных на большем расстоянии от перекрестка, чем появившееся / пропавшее в результате перестроения ТС, выполняется перестроение траекторий в порядке удаленности от перекрестка.
- 3) Наконец, с помощью полученного набора траекторий выполняется управление движением ТС на соответствующей полосе движения.

### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования разработанного метода были проведены в системе моделирования SUMO на трех сценариях.

Сценарий «1x1». Транспортная сеть представляет собой один регулируемый светофором перекресток, состоящий из двух контролируемых проезжих частей: однопольной и двупольной.

Сценарий «1x1 v2» Транспортная сеть представляет собой один регулируемый светофором перекресток, состоящий из четырех контролируемых двупольных проезжих частей.

Сценарий «cologne8» Транспортная сеть представляет собой участок транспортной сети города Кельн, содержащий 8 регулируемых перекрестков разного вида.

Экспериментальные исследования проводились при шаге симуляции, равном 0,1 секунде, и при общем времени симуляции 3600 секунд. В таблице 1 представлены результаты сравнения времени ожидания на светофоре при использовании разработанного метода управления траекторией движения ТС и без него. При этом переключение фаз светофоров осуществлялось часто используемым методом Uniform, при котором смена фаз светофора осуществляется через заранее фиксированные промежутки времени.

Таблица V. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА

Сценарий	Общее количество во ТС	Среднее время ожидания, с	
		Предлагаемый метод + Uniform	Uniform
«1x1»	900	0,001	10,06
«1x1 v2»	1080	4,01	20,41
«cologne8»	2046	3,80	26,01

Как видно из полученных результатов применение предлагаемого метода позволяет существенно понизить среднее время ожидания ТС на перекрестке.

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод формирования оптимальной траектории движения транспортных средств на контролируемом перекрестке. Представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие работоспособность предложенного метода.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-11-00321, <https://rscf.ru/en/project/21-11-00321/>).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мясников, В.В. Детерминированная прогнозная модель управления сигналами светофоров в интеллектуальных транспортных и геоинформационных системах / В.В. Мясников, А.А. Агафонов, А.С. Юмаганов // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 6. – С. 917-925. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1031.
- [2] Varaiya, P. The max-pressure controller for arbitrary networks of signalized intersections / P. Varaiya // Advances in dynamic network modeling in complex transportation systems. Vol. 2. Complex networks and dynamic systems. – New York: Springer, 2013. – P. 27-66. DOI: 10.1007/978-1-4614-6243-9\_2.
- [3] Wei, H. CoLight: Learning network-level cooperation for traffic signal control. / H. Wei, N. Xu, H. Zhang, G. Zheng, X. Zang, C. Chen, W. Zhang, Y. Zhu, K. Xu, Z. Li // Proc 28th ACM Int Conf on Information and Knowledge Management. – 2019. – P. 1913-1922. DOI: 10.1145/3357384.3357902.
- [4] Ma, J. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part II: Computational issues and optimization / J. Ma, X. Li, F. Zhou, J. Hu, B. Brian Park // Transportation Research Part B: Methodological. – 2017. – Vol. 95(B). – P. 421-441. DOI: 10.1016/j.trb.2016.06.010.
- [5] Guo, Y. DRL-TP3: A learning and control framework for signalized intersections with mixed connected automated traffic / Y. Guo, J. Ma // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2021. – Vol. 132. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103416.