

# Сравнение эффективности алгоритмов маршрутизации транспортных средств, используемых в централизованных системах управления

А.А. Агафонов<sup>а</sup>, В.В. Мясников<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

## Аннотация

Целью работы является сравнение эффективности алгоритмов маршрутизации транспортных средств в транспортных сетях. Рассматривается централизованный подход, при котором расчет маршрутов всех транспортных средств осуществляется в единой системе управления трафиком. Исследуются алгоритмы маршрутизации, основанные на выборе кратчайшего пути в статической зависящей от времени сети, а также влияние перестроения маршрута в процессе движения. Сравнение эффективности алгоритмов осуществляется на основе микроскопического моделирования движения транспортных средств в сети г. Самары.

*Ключевые слова:* маршрутизация транспортных средств; кратчайший путь; MATSim

## 1. Введение

Существующие постановки задачи навигации позволяют находить кратчайший путь или строить адаптивный маршрут движения в статических или зависящих от времени, детерминированных или стохастических транспортных сетях. Используемые автомобильные навигационные системы учитывают текущую или прогнозную информацию о состоянии транспортных потоков для построения маршрутов, позволяющих избегать дорожных заторов и минимизировать время движения. К сожалению, такие системы могут только реагировать на появление дорожных заторов, но не предотвращать их появление. В то же время, постепенное развитие автономных транспортных средств позволяет решать задачу минимизации времени движения с точки зрения эффективного распределения транспортных средств в сети. Такое распределение позволит уменьшить уровень дорожных заторов и сократить общее время поездок в сети.

Существуют различные подходы к классификации систем маршрутизации транспортных средств [1].

В статических системах задача маршрутизации решается в предположении, что характеристики транспортного потока являются независимыми от времени. Исследование различных алгоритмов нахождения кратчайшего пути проводится в работе [2]. В динамических системах учитывается информация о состоянии транспортных потоков в реальном времени, что позволяет реагировать на изменение транспортной ситуации [3, 4]. Следующим шагом в исследовании задачи маршрутизации является рассмотрение стохастических сетей, в которых время движения на сегментах дорожной сети рассматривается как случайная величина [5, 6, 7]. Стохастические системы требуют большого объема данных и вычислительных ресурсов для построения маршрута движения, однако позволяют выполнять навигацию транспортного средства с меньшими временными затратами.

Системы маршрутизации также могут быть классифицированы по типу информации, используемой для построения маршрута движения: системы реального времени и прогнозные системы. В [8] авторы исследуют эффективность различных стратегий маршрутизации в системах реального времени. Прогнозные системы выполняют маршрутизацию транспортного средства, основываясь на прогнозных значениях параметров транспортных потоков, рассчитанных для некоторого горизонта прогноза. В работе [9] исследуется метод определения кратчайшего пути в зависящей от времени стохастической сети, учитывающий текущую и прогнозную информацию о параметрах транспортных потоков в сети.

Рассмотренные работы в основном осуществляют процедуру маршрутизации, не учитывая влияния выбора маршрута транспортного средства на общее состояние транспортной сети. Движение транспортного средства на дорожном сегменте в состоянии насыщения может привести к образованию затора на этом сегменте. Следовательно, необходимо не только минимизировать время движения каждого транспортного средства, но и одновременно предотвращать переход сети в состояние перенасыщения.

В работе [10] рассматривается децентрализованный подход к маршрутизации транспортных средств на основе мультиагентных систем. Каждое транспортное средство рассматривается как агент, который не только выбирает маршрут движения, но и резервирует временной слот для транспортного средства на перекрестке. В статье [11] описывается архитектура системы, предназначенной для управления движением с целью предотвращения дорожных заторов. Представлен итеративный подход, основанный на алгоритме Дейкстры нахождения кратчайшего пути.

В данной работе рассматривается централизованный подход к маршрутизации транспортных средств. Предполагается, что построение маршрутов всех транспортных средств осуществляется в единой системе управления трафиком. Исследуются алгоритмы маршрутизации, основанные на выборе кратчайшего пути в детерминированной зависящей от времени транспортной сети, а также влияние перестроения маршрута в процессе движения на общее время поездки.

Работа построена следующим образом. Во втором разделе введены основные понятия и описаны алгоритмы маршрутизации. В третьем разделе представлены постановка и результаты экспериментов по сравнению эффективности

алгоритмов на основе микроскопического моделирования движения транспортных средств. В завершение работы представлены заключение, благодарности и список использованных источников.

## 2. Постановка задачи

### 2.1. Основные понятия

Улично-дорожную сеть представим в виде ориентированного графа, дуги которого соответствуют сегментам дорожной сети, а вершины – перекресткам. В общем случае будем рассматривать зависящий от времени граф  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество вершин графа,  $|V|$  – количество вершин,  $E$  – множество рёбер графа,  $|E|$  – количество рёбер.

Каждый дорожный сегмент характеризуется зарезервированным трафиком  $r_{ij}(\tau), i \in V, j \in V, e_{ij} \in E$ , т.е. количеством транспортных средств, находящихся на дорожном сегменте в момент времени  $\tau$ .

Пусть  $U$  – множество транспортных средств. Для каждого транспортного средства  $u_k \in U$  считаются известными вершины отправления и назначения, а также время начала движения, т.е.  $u_k = \{o_k, d_k, \tau_k\}$ , где

$o_k$  – вершина отправления;

$d_k$  – вершина назначения;

$\tau_k$  – время начала движения.

Пусть  $p_k = \{e_{ij} \in E\}$  – кратчайший путь  $k$ -го транспортного средства между вершинами  $o_k$  и  $d_k$ .

Тогда задача маршрутизации транспортных средств заключается в минимизации суммарного времени поездки всеми участниками движения:

$$\min_{p_k} \sum_{u_k \in U} p_k.$$

Далее будут рассмотрены различные алгоритмы выбора кратчайшего пути  $p_k$ .

### 2.2. Алгоритм маршрутизации в статической сети, основанный на алгоритме Дейкстры

Алгоритм маршрутизации в статической сети является базовым и не учитывает загрузку дорожных сегментов транспортными средствами, движущимися по маршрутам.

Кратчайший путь  $p_k$  для каждого транспортного средства  $u_k \in U$  не зависит от состояния транспортной сети. Для расчета кратчайших путей используется алгоритм Дейкстры.

### 2.3. Алгоритм маршрутизации в зависящей от времени сети

Кратчайший путь в зависящей от времени сети выбирается с учетом текущей загрузки дорожных сегментов.

Существуют различные алгоритмы расчета времени прохождения дорожного сегмента, исходя из плотности транспортного потока на сегменте [12]. В данной работе используется модель Гринберга [13], связывающая скорость движения на сегменте и плотность транспортного потока:

$$v_{ij}(\tau) = v_{ij}^m \log \frac{r_{ij}^m}{r_{ij}(\tau)},$$

где  $v_{ij}^m$  – максимальная скорость движения на дорожном сегменте  $e_{ij} \in E$  (скорость свободного потока);

$r_{ij}^m$  – максимальная плотность транспортного потока на дорожном сегменте  $e_{ij} \in E$  (при которой возникает затор).

Тогда время прохождения дорожного сегмента может быть рассчитано по формуле

$$t_{ij}(\tau) = \frac{|e_{ij}|}{v_{ij}(\tau)},$$

где  $|e_{ij}|$  – длина дорожного сегмента.

*Алгоритм маршрутизации*

1. Множество  $U$  упорядочивается по времени начала движения транспортными средствами  $\tau_k$ .
2.  $\forall u_k \in U$  рассчитывается кратчайший путь  $p_k(\tau_k)$  в зависящей от времени транспортной сети. Весом дорожного сегмента является время прохождения сегмента  $t_{ij}(\tau)$ . Для расчета кратчайшего пути используется быстрый алгоритм A\* [14].

3.  $\forall e_{ij} \in p_k(\tau_k)$  рассчитывается время въезда  $\tau_{in}$  и время выезда  $\tau_{out}$  с дорожного сегмента. Обновляется информация о загрузке дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) + 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$

#### 2.4. Алгоритм маршрутизации с возможностью перестроения маршрута

Логичной модификацией алгоритма маршрутизации в зависящей от времени сети является добавление возможности перестроения маршрута в процессе движения транспортного средства. При перестроении маршрутов важен порядок выбора транспортных средств, для которых запускается процедура перемаршрутизации. В работе рассмотрено два способа выбора порядка обхода транспортных средств: с упорядочиванием по расстоянию до вершины прибытия по возрастанию (т.е. приоритет у коротких маршрутов), и убыванию (т.е. приоритет у длинных маршрутов).

##### Алгоритм маршрутизации

1. Множество  $U$  упорядочивается по времени начала движения транспортными средствами  $\tau_k$ .
2.  $\forall u_k \in U$  рассчитывается кратчайший путь  $p_k(\tau_k)$  в зависящей от времени транспортной сети. Весом дорожного сегмента является время прохождения сегмента  $t_{ij}(\tau)$ . Для расчета кратчайшего пути используется быстрый алгоритм A\* [14].
3. Через заранее определенный интервал времени выполняется перестроение маршрутов транспортного средства:
  - 3.1. Очищается информация о загрузке дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau) = 0, \forall \tau$ .
  - 3.2. Транспортные средства, находящиеся на маршруте, упорядочиваются по выбранному критерию: получаем множество  $U_{sort}$ .
  - 3.3.  $\forall u_k \in U_{sort}$  рассчитывается кратчайший путь  $p_k(\tau_k)$  в зависящей от времени транспортной сети.
  - 3.4.  $\forall e_{ij} \in p_k(\tau_k)$  рассчитывается время въезда  $\tau_{in}$  и время выезда  $\tau_{out}$  с дорожного сегмента. Обновляется информация о загрузке дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) + 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$
4. Если просмотрены все транспортные средства  $u_k \in U$  - маршрутизации закончена, иначе переход на шаг 3.

### 3. Эксперименты

Для моделирования движения транспортных средств используется библиотека MATSim [15]. MATSim – это программное обеспечение с открытым исходным кодом, предназначенное для микроскопического моделирования крупномасштабных сценариев в мультиагентных системах. В MATSim реализовано несколько моделей микроскопического моделирования транспортных средств. В работе используется модель на основе очередей QSim [16].

Экспериментальный анализ исследуемых алгоритмов был проведен на транспортной сети г. Самары. Эксперимент состоял из следующих этапов:

1. Для 40 тысяч транспортных средств случайным образом были сгенерированы вершины отправления и прибытия, а также время начала движения.
2. Для каждого транспортного средства описанными в разделах 2.1 – 2.3 алгоритмами маршрутизации был рассчитан кратчайший путь и посчитано среднее время поездок.
3. С помощью библиотеки MATSim было смоделировано движение транспортных средств по выбранным маршрутам и посчитано среднее время поездок.

Каждый эксперимент повторялся для различных коэффициентов допустимой загрузки дорожной сети. Коэффициент загрузки дорожной сети определяет долю плотности транспортного потока, используемого при моделировании, относительно плотности потока в реальной дорожной сети. Например, если в системе моделируется движение 10% от общего количества транспортных средств, то коэффициент загрузки дорожной сети принимают равным 0.1.



Рис. 1. Моделирование движения транспортных средств.

На рисунке 1 показан пример моделирования транспортных средств с помощью библиотеки MATSim в транспортной сети г. Самара.

На рисунке 2 показана зависимость среднего времени поездки, посчитанного алгоритмами маршрутизации в зависящей от времени сети с возможностью перестроения маршрута и без него, от коэффициента загрузки дорожной сети.

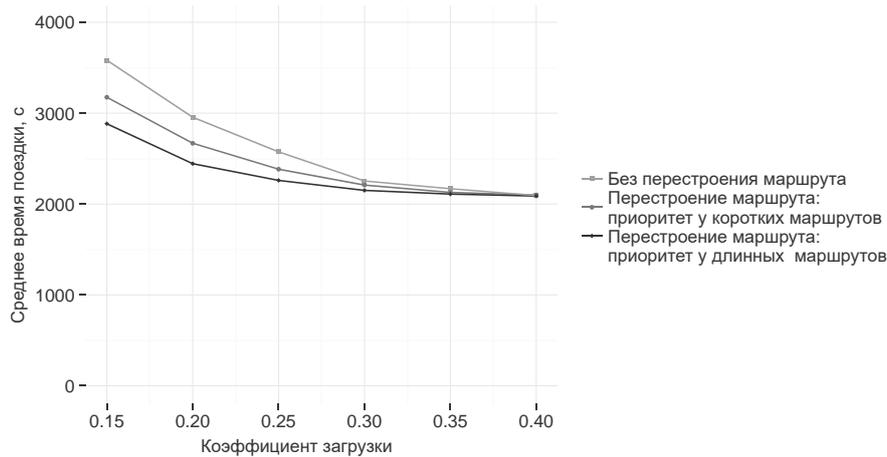


Рис. 2. Среднее время поездки, рассчитанное алгоритмами маршрутизации.

На рисунке 3 показана зависимость среднего времени поездки, полученного в процессе имитационного микромоделирования движения транспортных средств с помощью библиотеки MATSim, от коэффициента загрузки дорожной сети.

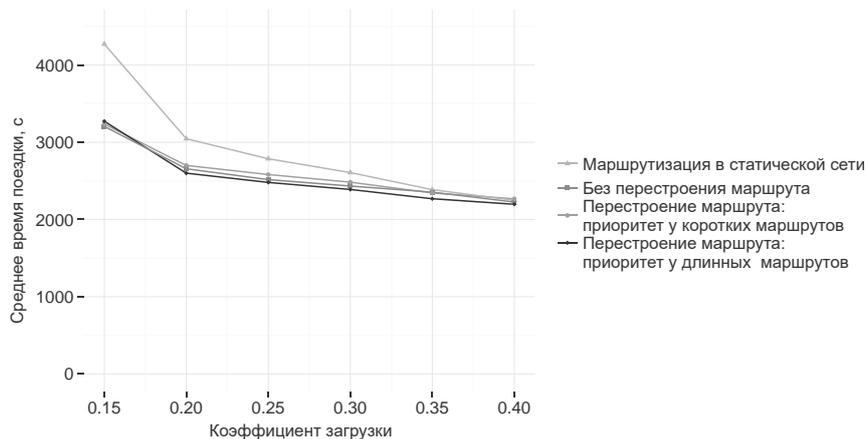


Рис. 3. Среднее время поездки, рассчитанное с помощью микромоделирования движения.

Алгоритм маршрутизации с возможностью перестроения маршрутов при упорядочивании по убыванию расстояния до вершины прибытия показал лучший результат и при расчете маршрутов, и при имитационном моделировании движения транспортных средств.

#### 4. Заключение

В данной работе рассмотрены алгоритмы маршрутизации, основанные на выборе кратчайшего пути в детерминированной зависящей от времени транспортной сети, а также влияние перестроения маршрута в процессе движения. Проведено исследование алгоритмов на транспортной сети г. Самара. Лучший результат показал алгоритм маршрутизации с возможностью перестроения маршрутов в процессе движения при упорядочивании транспортных средств по убыванию расстояния до вершины прибытия.

Недостатком предложенных алгоритмов маршрутизации в зависящей от времени сети является тот факт, что информация о загрузке дорожных сегментов влияет только на новые маршруты движения и не затрагивает уже рассчитанные. Разработка алгоритмов, исправляющих указанный недостаток, является направлением дальнейших исследований.

#### Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ 16-37-00055- мол\_а, 17-29-03190 офи\_м.

## Литература

- [1] Schmitt, E.J. Vehicle route guidance systems: Classification and comparison / E.J. Schmitt, H. Jula // (2006) IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC. – 2006. – P. 242-247.
- [2] Zhan, F.B. Three fastest shortest path algorithms on real road network: data structure and procedures / F.B. Zhan // Journal of geographic information and decision analysis. – 1997. – Vol. 1. – P. 69-82.
- [3] Hall, R. The Fastest Path through a Network with Random Time-Dependent Travel Time / R. Hall // Transportation Science. – 1986. – Vol. 20. – P. 182-188.
- [4] Fu, L. Adaptive Routing Algorithm for In-Vehicle Route Guidance Systems with Real-Time Information / L. Fu // Transportation Research Part B: Methodological. – 2001. – Vol. 25. – P. 749-765.
- [5] Gao, S. Optimal routing policy problems in stochastic time-dependent networks / S. Gao, I. Chabini // Transportation Research Part B. – 2006. – Vol. 40. – P. 93-122. DOI: 10.1016/j.trb.2005.02.001.
- [6] Samaranayake, S. A tractable class of algorithms for reliable routing in stochastic networks / S. Samaranayake, S. Blandin, A. Bayen // Transportation Research Part C. – 2012. – Vol. 20. – P. 199-217. DOI: 10.1016/j.trc.2011.05.009.
- [7] Wu, X. Modeling heterogeneous risk-taking behavior in route choice: a stochastic dominance approach / X. Wu, Y. Nie // Transportation Research Part A. – 2011. – Vol. 45. – P. 896-915. DOI: 10.1016/j.tra.2011.04.009.
- [8] Yibing, W. Feedback and iterative routing strategies for freeway networks / W. Yibing, M. Papageorgiou, A. Messmer // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications. – 2001. – P. 1162-1167.
- [9] Агафонов, А.А. Метод определения надёжного кратчайшего пути в зависящей от времени стохастической сети и его применение в геоинформационных задачах управления транспортом / А.А. Агафонов, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 275-283. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-275-283.
- [10] Claes, R. A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems / R. Claes, T. Holvoet, D. Weyns // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2011. – Vol. 12 (2). – P. 364-373. DOI: 10.1109/TITS.2011.2105867.
- [11] Menelaou, C. A congestion-free vehicle route reservation architecture / C. Menelaou, P. Kolios, S. Timotheou, C.G. Panayiotou // Proceedings of the 18th Mediterranean Electrotechnical Conference: Intelligent and Efficient Technologies and Services for the Citizen, MELECON 2016. – 2016. – P. 1-6. DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495458.
- [12] Wang, H. Speed-Density Relationship: from Deterministic to Stochastic / H. Wang, J. Li, Q.Y. Chen, D. Ni // The 88th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting. – 2009. – P. 1-20.
- [13] Greenberg, H. An analysis of traffic flow / H. Greenberg // Operation Research. – 1959. – Vol. 7. – P. 79-85.
- [14] Lefebvre, N. Fast shortest path computation in time-dependent traffic network / N. Lefebvre, M. Balmer // The 7<sup>th</sup> Swiss Transport Research Conference (STRC). – 2007. – Working Paper 439.
- [15] MATSim Web Site [Electronic resource]. — Access mode: <http://matsim.org> (04.02.2017).
- [16] Gawron, C. An iterative algorithm to determine the dynamic user equilibrium in a traffic simulation model / C. Gawron // International Journal of Modern Physics C. – 1998. – Vol. 9 (3). – P. 393-408.