

# Маршрутизация автономных транспортных средств в зависящих от времени транспортных сетях

А.А. Агафонов<sup>1</sup>, В.В. Мясников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

<sup>2</sup>Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

**Аннотация.** В данной работе рассматривается задача маршрутизации автономных транспортных средств. Рассматриваемая архитектура маршрутизации заключается в де-композиции сегментов дорожной сети на слоты в пространственной и временной областях и резервировании слотов для каждого транспортного средства. Такая архитектура позволяет минимизировать время движения и одновременно предотвращать образование дорожных заторов. В статье рассматривается централизованный подход к маршрутизации транспорт-ных средств. Исследуются алгоритмы маршрутизации, основанные на итеративных процедурах перестроения маршрута. Сравнение эффективности алгоритмов маршрутизации проведено на основе микроскопического моделирования движения транспортных средств в сети г. Самара.

## 1. Введение

Проблема дорожных заторов является одной из самых важных проблем в транспортных системах. Рост уровня трафика в густонаселенных районах уменьшает эффективность транспортной инфраструктуры, увеличивая время поездки в сети, расход топлива и уровень загрязнения окружающей среды. Основной причиной перегруженности дорожной сети является то, что в определенные периоды количество транспортных средств на сегментах дорожной сети приближается или даже превышает критическую пропускную способность сегментов. Эта проблема возникает не только из-за недостаточного уровня общей пропускной способности сети, но и из-за отсутствия механизмов, которые могут обеспечить эффективное использование сети [1].

Решение проблемы эффективного использования дорожной сети в настоящее время достигается либо путем изменения дорожной инфраструктуры, что зачастую приводит только к кратковременному положительному эффекту и оказывается экономически недостаточно целесообразным, либо (для участников движения) путем планирования маршрута движения с учетом текущей и прогнозной загрузки дорожной сети. С учетом существующего опыта оба подхода не дают полноценного решения обозначенной проблемы, что ведет к поиску альтернативных путей ее решения.

Постепенное развитие автономных транспортных средств позволяет рассматривать задачу навигации как задачу управления движением транспортных средств в рамках единой (централизованной) интеллектуальной транспортной системы. Такой подход к повышению эффективности использования дорожной инфраструктуры позволит уменьшить уровень дорожных заторов и сократить общее время поездок в сети. Для построения маршрутов движения для каждого транспортного средства используются как

статические, так и стохастические модели, основанные на прогнозировании параметров транспортных потоков [2, 3]. Задача нахождения кратчайшего пути в зависящей от времени стохастической сети была исследована в [4]. Была предложена адаптивная процедура построения оптимального маршрута: маршрут может измениться в вершине графа сети в зависимости от наименьшего ожидаемого времени прибытия в точку назначения. В [5] расширяется работа [4] и предлагается адаптивный алгоритм маршрутизации, где предполагается доступность информации о времени прохождения сегментов дорожной сети в реальном времени. Задача априорного кратчайшего пути в стохастических и зависящих от времени сетях предложена в [6]. В работе считается известной функция плотности вероятности времени прохождения дорожных сегментов. В [7, 8] предложили адаптивные модели выбора маршрута в стохастических зависящих от времени сетях как в предположении о полностью известном состоянии транспортной сети, так и без него.

В настоящее время, благодаря развитию автономных транспортных средств, задача минимизации времени движения может рассматриваться с точки зрения эффективного распределения транспортных средств по сегментам сети таким образом, чтобы не только уменьшить время движения транспортного средства, но и не допустить создания дорожных заторов на сегментах сети. В работе [9] 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 на перекрестке. В статьях [10, 11] описывается архитектура системы, предназначенной для управления движением с целью предотвращения дорожных заторов. В работах [12, 13] представлена навигационная система, предназначенная для перестроения маршрута в случае возникновения дорожных заторов. В работе [14] рассматриваются базовые алгоритмы маршрутизации автономных транспортных средств в статических и зависящих от времени транспортных сетях.

В данной работе рассматривается централизованный подход к маршрутизации транспортных средств. При централизованном подходе предполагается, что построение маршрутов всех транспортных средств осуществляется в единой системе управления трафиком. Исследуются алгоритмы маршрутизации транспортных средств на основе итеративной процедуры достижения транспортного равновесия в сети.

Работа построена следующим образом. Во втором разделе введены основные понятия и описан базовый алгоритм маршрутизации, предложен алгоритм маршрутизации на основе итеративной процедуры перестроения маршрутов с целью достижения транспортного равновесия в сети. 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 обозначения

Дорожная сеть рассматривается как зависящий от времени граф  $G = (V, E)$ , где  $V$  - множество вершин графа,  $|V|$  - число вершин,  $E$  - множество ребер графа,  $|E|$  - число ребер. Вершины графа соответствуют перекресткам дорожной сети, ребра - сегментам сети.

Каждый дорожный сегмент характеризуется зарезервированным трафиком  $r_{ij}(\tau)$ ,  $i \in V, j \in V, e_{ij} \in E$ , т.е. количеством транспортных средств на дорожном сегменте  $e_{ij} \in E$  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  $p_k = \{e_{o_k, j_1}, e_{j_1, j_2}, \dots, e_{j_n, d_k}\}$ ,  $e_{ij} \in E$  - путь  $k$ -го транспортного средства между вершинами  $o_k$  и  $d_k$ .

Тогда задача маршрутизации заключается в минимизации суммарного времени поездок всех транспортных средств  $u_k \in U$  и может быть сформулирована как:

$$\min_{p_k} \sum_{u_k \in U} p_k. \quad (1)$$

В следующих подразделах будут описаны алгоритмы для выбора кратчайшего пути  $p_k$ . Точное время движения по пути  $p_k$  может быть измерено только при достижении вершины назначения  $d_k$ . Для получения оценок времени движения будут использованы алгоритмы маршрутизации, описанные далее.

## 2.2. Базовый алгоритм маршрутизации в зависящей от времени сети

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

В качестве базового алгоритма был выбран алгоритм маршрутизации с возможностью перестроения маршрута, описанный в [14]. Для процедуры перестроения маршрута важным является порядок выбора транспортных средств. В работе рассмотрено три способа выбора порядка обхода транспортных средств: без упорядочивания, с упорядочиванием по расстоянию до вершины прибытия по возрастанию (т.е. приоритет у коротких маршрутов), и убыванию (т.е. приоритет у длинных маршрутов).

---

### Алгоритм 1: Перестроение маршрута

---

```

Рассчитать кратчайший путь  $p_k, \forall u_k \in U$  и загрузку дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau)$ .
 $time_{last} = 0$ ;
while  $U \neq \emptyset$  do
  if  $(time - time_{last}) > \Delta_{time}$  then
    Очистить информацию о загрузке дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau) = 0, \forall \tau, e_{ij} \in E$ ;
    Упорядочить множество транспортных средств по выбранному критерию:  $U_{sort}$ 
    for  $u_k \in U_{sort}$  do
      Вычислить кратчайший путь  $p_k$  от текущего положения до  $d_k$ ;
      for  $e_{ij} \in p_k$  do
        Вычислить время въезда на дорожный сегмент  $\tau_{in}$ ;
        Вычислить время выезда с дорожного сегмента  $\tau_{out}$ ;
        Обновить информацию о загрузке дорожных сегментов:
           $r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) + 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$ ;
      end
    end
     $time_{last} = time$ ;
  end
  if  $u_k$  достигло вершины назначения then
    | Удалить  $u_k$  из  $U$ ;
  end
end

```

---

В алгоритме 1:  $time$  - текущий момент времени,  $\Delta_{time}$  - предопределенный интервал запуска процедуры перемаршрутизации.

Для расчета кратчайшего пути используется быстрый алгоритм  $A^*$ . Весом дорожного сегмента является время прохождения сегмента  $t_{ij}(\tau)$ . Существуют различные алгоритмы

расчета времени прохождения дорожного сегмента, исходя из плотности транспортного потока на сегменте [15]. В данной работе используется модель Гринберга [16]:

$$v_{ij}(\tau) = v_{ij}^* \log \frac{r_{ij}^*}{r_{ij}(\tau)}, \quad t_{ij}(\tau) = \frac{|e_{ij}|}{v_{ij}(\tau)}. \quad (2)$$

где  $v_{ij}^*$  - скорость свободного потока на дорожном сегменте  $e_{ij} \in E$ ;  
 $r_{ij}^*$  - максимальная плотность транспортного потока на дорожном сегменте  $e_{ij} \in E$ ;  
 $t_{ij}(\tau)$  - время прохождения дорожного сегмента;  
 $|e_{ij}|$  длина дорожного сегмента.

Алгоритм имеет следующий недостаток: суммарное время поездки зависит от порядка выбора транспортных средств  $u_k \in U$ , т.к. в сети не существует транспортного равновесия. В следующем разделе предложен алгоритм маршрутизации на основе итеративной процедуры перестроения маршрутов.

### 2.3. Алгоритм маршрутизации на основе итеративной процедуры перестроения маршрута

Стандартный способ найти транспортное равновесие в сети заключается в использовании итеративной процедуры. Этот подход является общим при решения задач распределения трафика по сети в имитационных моделях моделирования [17].

---

#### Алгоритм 2: Итеративное перестроение маршрута

---

```

Рассчитать кратчайший путь  $p_k(\tau_k), \forall u_k \in U$  и загрузку дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau)$ ;
 $time_{last} = 0$ ;
while  $U \neq \emptyset$  do
  if  $(time - time_{last}) > \Delta_{time}$  then
     $T_{avg} = 0; T_{avg}^{old} = 0; iter = 0$ ;
    do
       $T_{avg}^{old} = T_{avg}$ ;
      for  $u_k \in U$  do
        Удалить транспортное средство  $u_k$  из зарезервированного трафика:
        for  $e_{ij} \in p_k$  do
          | Вычислить  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$ ;  $r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) - 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$ ;
        end
        Пересчитать кратчайший путь  $p_k$ , используя информацию  $r_{ij}(\tau)$ .
        Добавить  $u_k$  в зарезервированный трафик:
        for  $e_{ij} \in p_k$  do
          | Вычислить  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$ ;  $r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) + 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$ ;
        end
      end
      Рассчитать  $T_{avg}$ ;
       $iter = iter + 1$ ;
      while  $|T_{avg}^{old} - T_{avg}| > \Delta_{avg} \ \&\& \ iter \leq iter_{max}$ ;
       $time_{last} = time$ ;
    end
    if  $u_k$  достигло вершины назначения then
      | Удалить  $u_k$  из  $U$ ;
    end
  end
end

```

---

В алгоритме 2:

$time$  - текущий момент времени;

$\Delta_{time}$  - предопределенный интервал перестроения маршрутов;

$T_{avg}$  среднее время поездки, рассчитанное по всем кратчайшим путям  $p_k$ ;

$\Delta_{avg}$  максимальная разница среднего времени поездки;

$iter_{max}$  максимальный номер итерации.

#### 2.4. Алгоритм маршрутизации на основе перестроения маршрута для отдельных транспортных средств

Алгоритм маршрутизации, описанный в предыдущем разделе, рассчитывает маршруты движения всех транспортных средств в процессе процедуры перестроения маршрутов. Другим простым решением является расчет маршрутов движения и обновление информации о загрузке дорожных сегментов отдельно для каждого транспортного средства. Тогда процедура перестроения маршрута может быть выполнена в момент достижения транспортным средством перекрестка (выезда из дорожного сегмента).

---

#### Алгоритм 3: Перестроение маршрута для каждого транспортного средства

---

Рассчитать кратчайший путь  $p_k, \forall u_k \in U$  и загрузку дорожных сегментов  $r_{ij}(\tau)$ ;

**while**  $U \neq \emptyset$  **do**

**if**  $u_k$  достигло конца дорожного сегмента **then**

        // Процедура перестроения маршрута

        Удалить транспортное средство  $u_k$  из зарезервированного трафика:

**for**  $e_{ij} \in p_k$  **do**

            Вычислить  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$ ;

$r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) - 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$ ;

**end**

        Пересчитать кратчайший путь  $p_k$  используя обновленную информацию  $r_{ij}(\tau)$ .

        Добавить  $u_k$  в зарезервированный трафик:

**for**  $e_{ij} \in p_k$  **do**

            Вычислить  $\tau_{in}$  и  $\tau_{out}$ ;

$r_{ij}(\tau) = r_{ij}(\tau) + 1, \forall \tau \in [\tau_{in}, \tau_{out})$ ;

**end**

**end**

**if**  $u_k$  достигло вершины назначения **then**

        | Удалить  $u_k$  из  $U$ ;

**end**

**end**

---

В следующем разделе описано экспериментальное исследование предложенных алгоритмов маршрутизации транспортных средств.

### 3. Эксперименты

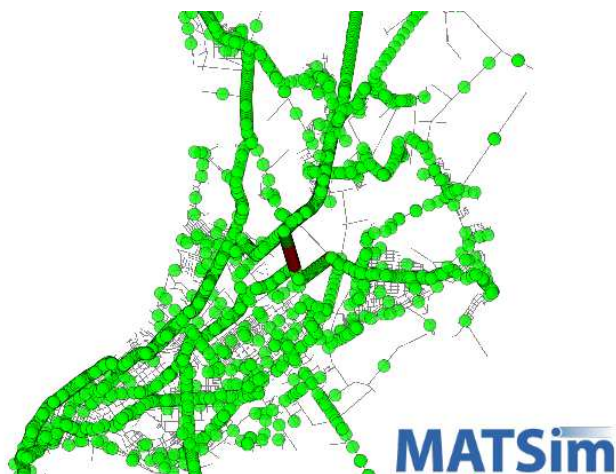
Экспериментальное исследование алгоритмов маршрутизации было проведено на основе микроскопического моделирования движения транспортных средств с помощью библиотеки MATSim [18], предназначенной для моделирования сценариев движения в крупномасштабных транспортных сетях. MATSim поддерживает несколько микроскопических моделей движения транспортных средств, в статье используется модель QSim [17].

Предложенные алгоритмы исследовались на транспортной сети г. Самары, состоящей из 7451 вершин и 18586 дорожных сегментов. Эксперименты состояли из следующих шагов:

- 1) Для 40 тысяч транспортных средств  $u_k \in U$  случайным образом были сгенерированы вершины отправления и прибытия, а также время начала движения.
- 2) Для каждого транспортного средства был рассчитан кратчайший путь и посчитано среднее время поездок алгоритмами 1-3, описанными в разделах 2.2-2.4.
- 3) С помощью библиотеки MATSim было смоделировано движение транспортных средств по выбранным путям и посчитано смоделированное 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.

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



**Рисунок 1.** Моделирование движения транспортных средств.

В таблице 1 и на рисунке 2 показана зависимость среднего времени поездки (в секундах), рассчитанного с помощью микроскопического моделирования, от различных коэффициентов допустимой загрузки дорожной сети.

**Таблица 1.** Среднее время поездки

	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
Алгоритм 1 без сортировки	3052.2	2797.1	2378.5	23154	2253.3
Алгоритм 1, приоритет у коротких маршрутов	2931.8	2724.5	2363.4	2308.7	2251.7
Алгоритм 1, приоритет у длинных маршрутов	3076.6	2801.9	2402.4	2347.5	2272.2
Алгоритм 2	2970.4	2698.6	2334.4	2296.9	2247.2
Алгоритм 3	3012.9	2639.9	2318.6	2282.3	2230.4

Алгоритм маршрутизации с возможностью перестроения маршрутов для каждого транспортного средства показал лучшие результаты по критерию среднего времени

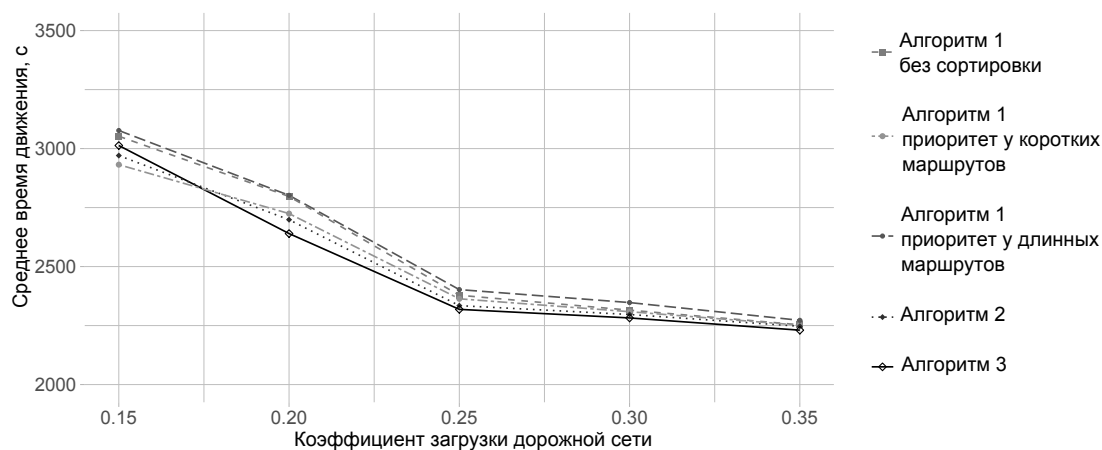


Рисунок 2. Среднее время поездки.

поездки. Однако, как и алгоритм на основе итеративной процедуры перестроения маршрута, данный алгоритм требует значительных вычислительных затрат.

#### 4. Заключение

В данной работе рассмотрены алгоритмы маршрутизации транспортных средств в зависящих от времени транспортных сетях. Предложены алгоритмы маршрутизации на основе итеративной процедуры перестроения маршрута, а также на основе перестроения маршрута для каждого транспортного средства. Исследование разработанных алгоритмов было проведено с помощью микроскопического моделирования движения транспортных средств в сети г. Самары. Лучшие результаты по критерию среднего времени движения показал алгоритм с процедурой перестроения маршрута для каждого транспортного средства.

Основным недостатком предложенных алгоритмов является тот факт, что время прохождения дорожного сегмента является одинаковым для разных транспортных средств. В реальной транспортной сети движение транспортных средств может варьироваться в зависимости от полосы движения, загрузке дорожных сегментов на маршрутах движения и других факторов. Разработка алгоритмов, исправляющих указанный недостаток, является направлением дальнейших исследований.

#### 5. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) и гранта РФФИ 18-07-00605-А.

## 6. Литература

- [1] Chen, C. Causes and cures of highway congestion / C. Chen, Z. Jia, P. Varaiya // *IEEE Control Syst. Mag.* — 2001. — Vol. 21(6). — P. 26–32.
- [2] Xiao, L. Adaptive vehicle navigation with en route stochastic traffic information / L. Xiao, H.K. Lo // *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* — 2015 — Vol. 15(5). — P. 1900-1912.
- [3] Агафонов, А.А. Метод определения надчужного 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.
- [4] Hall, R. The Fastest Path through a Network with Random Time-Dependent Travel Time / R. Hall // *Transportation Science.* — 1986. — Vol. 20. — P. 182-188.
- [5] Fu, L. An adaptive routing algorithm for in-vehicle route guidance systems with real-time information / L. Fu // *Transportation Research Part B: Methodological.* — 2001. — Vol. 35 (8). — P. 749-765.
- [6] Nie, Y. Shortest path problem considering on-time arrival probability / Y. Nie, X. Wu // *Transportation Research Part B.* — 2009. — Vol. 43 (6). — P. 597-613.
- [7] 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.
- [8] Gao, S. Adaptive route choice models in stochastic time-dependent networks / S. Gao, E. Frejinger, M. Ben-Akiva // *Transportation Research Record.* — 2008. — Vol. 2085 (1). — P. 136-143.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Menelaou, C. Controlling road congestion via a low-complexity route reservation approach / C. Menelaou, Kolios, S. Timotheou, C.G. Panayiotou, M.P. Polycarpou // *In Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* — 2017. — Vol. 81. — P. 118-136.
- [12] Wang, S. A multi-agent based vehicles rerouting system for unexpected traffic congestion avoidance / Wang, S. Djahel, J. McManis // *17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2014.* — 2014. — P. 2541-2548.
- [13] Wang, S. Next road rerouting: A multiagent system for mitigating unexpected urban traffic congestion / Wang, S. Djahel, Z. Zhang, J. McManis // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.* — 2016. — Vol. 17(10). — P. 2888-2899.
- [14] Агафонов А.А. Сравнение эффективности алгоритмов маршрутизации транспортных средств, используемых в централизованных системах управления / А.А. Агафонов, В.В. Мясников // *ИТНТ-2017.* — 2017. — с. 552-556.
- [15] Wang, H. Speed-density relationship: from deterministic to stochastic / H. Wang, J. Li, Q. Chen, D. Ni // *The 88th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting.* — 2009. — P. 1–20.
- [16] Greenberg, H. An analysis of traffic flow / H. Greenberg // *Operation Research.* — 1959. — Vol. 7. — P.79-85.
- [17] 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. 393–407.
- [18] Matsim [Electronic resource] — Access mode: <http://matsim.org> (21.11.2017)



# Autonomous vehicles routing in time-dependent transportation networks

A.A. Agafonov<sup>1</sup>, V.V. Myasnikov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

<sup>2</sup>Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

**Abstract.** In this paper we consider autonomous vehicles routing algorithms in time-dependent transportation networks. The considered routing architecture decomposes road segments into slots in spatial-temporal domains and reserves slots for each vehicle. Such approach allows to avoid traffic congestion while minimizing the travelling time. We consider a centralized approach, assuming that routes are calculated in a centralized traffic management system. In this paper, we compare the efficiency of routing algorithms based on the iterative rerouting procedures. The experiments are carried out in microscopic simulation of a real-world traffic environment in the transportation network of Samara, Russia.

**Keywords:** anticipatory routing, autonomous vehicle, intelligent transportation system, shortest path.