

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ МАРШРУТОВ В ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ЗАДАЧЕ МАРШРУТИЗАЦИИ АВТОНОМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

А.А. Агафонов¹, В.В. Мясников^{1,2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

² ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

Аннотация

Разработка автономных транспортных средств является современным трендом как теоретических, так и практических исследований. Управление автономными транспортными средствами в рамках интеллектуальной транспортной системы позволит значительно сократить уровень дорожных заторов и уменьшить длительность поездок в сети. В работе рассматривается метод резервирования маршрутов движения для управления городским трафиком. В рамках рассматриваемого метода каждое транспортное средство резервирует пространственный и временной слот на дорожном сегменте, входящем в его маршрут, что позволяет прогнозировать загрузку сегментов и находить кратчайший путь с большей точностью. Предложено использовать процедуру перестроения маршрута для повышения качества маршрутизации. Экспериментальное исследование метода маршрутизации проведено с помощью микроскопического моделирования движения транспортных средств.

Ключевые слова: маршрутизация транспортных средств, резервирование маршрутов, кратчайший путь, моделирование движения.

Цитирование: Агафонов, А.А. Исследование численного метода резервирования маршрутов в геоинформационной задаче маршрутизации автономных транспортных средств / А.А. Агафонов, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 912-920. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-912-920.

Введение

В настоящее время автономные транспортные средства являются предметом исследований теоретического и прикладного характера как в научных организациях, так и в промышленности. Популярность этого направления исследований объясняется как последними достижениями в области сенсорных и вычислительных технологий, так и потенциальными преимуществами широкого использования автономных транспортных средств: их распространение позволит повысить безопасность дорожного движения, снизить уровень дорожных заторов и повысить мобильность.

Доступность бортовых вычислительных систем и технологий беспроводной связи позволяет транспортным средствам обмениваться информацией между собой и с объектами дорожной инфраструктуры, что приводит к исследованиям подключенных транспортных средств (*connected vehicles*) [1]. Эта область исследований направлена на повышение безопасности дорожного движения и эффективности использования автомобильного транспорта за счёт координации между отдельными транспортными средствами. Например, использование технологии подключенных автомобилей потенциально позволит повысить пропускную способность перекрёстков [2] или предотвратить образование дорожных заторов [3].

В системе принятия решений управления автономным транспортным средством обычно выделяется четыре иерархических уровня [4, 5]. На самом высоком уровне выполняется построение маршрута движения. Далее, учитывая последовательность сег-

ментов дороги, определяющих выбранный маршрут, на поведенческом уровне решается, какие действия должны быть предприняты для следования по маршруту движения с соблюдением правил дорожного движения, учётом поведения других участников движения, сигналов светофоров и т.д. На третьем уровне последовательность управляющих сигналов преобразуется в траекторию движения. Выбранная траектория движения должна быть динамически осуществима для автомобиля и удобна для пассажира. На заключительном уровне система управления отвечает за выполнение выбранной траектории движения и корректировку ошибок движения на основе механизма обратной связи.

В работе рассматривается первый этап системы принятия решений: построение маршрута движения. Для нахождения маршрута движения дорожная сеть представляется в виде ориентированного графа с весами рёбер, соответствующим затратам на прохождение дорожного сегмента, а задача нахождения маршрута движения сводится к задаче нахождения кратчайшего пути в графе. Существует большое количество работ, посвященных решению этой задачи как в статических, так и в зависящих от времени транспортных сетях. Классическими алгоритмами нахождения кратчайшего пути принято считать алгоритмы Дейкстры [6] или A* [7]. Для решения проблемы эффективного планирования маршрутов в крупномасштабных транспортных сетях и повышения быстродействия работы были разработаны семейства алгоритмов, которые после выполнения предварительной обработки данных позволяют находить кратчайший

путь в дорожных сетях масштаба континентов за миллисекунды [8, 9]. Обзор алгоритмов поиска кратчайшего пути, включая поиск кратчайшего пути на общественном транспорте, можно найти в [10].

Существующие алгоритмы поиска пути, реализованные в составе интеллектуальных транспортных систем, картографических сервисов или бортовых навигационных систем, в основном позволяют находить кратчайший маршрут на основе текущей информации о распределении транспортных потоков и не позволяют быстро реагировать на изменение дорожной ситуации и предлагать альтернативный маршрут движения. Кроме того, предоставление схожих маршрутов движения и информации о состоянии транспортных потоков разным водителям может приводить к образованию новых заторов, т.к. большинство водителей будут выбирать менее загруженные маршруты движения. Такое поведение, как показано в [11], приводит к колебаниям состояния сети и ухудшает транспортную ситуацию в целом.

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. В [12] исследуются статические и динамические, детерминированные и стохастические, реактивные и прогнозные, а также централизованные и децентрализованные системы построения маршрутов. Задача построения надежного кратчайшего пути рассматривалась в [13]. Обзор существующих методов управления дорожными заторами представлен в [14]. В статье изучаются многоагентные системы, показано преимущество гибридных систем, в которых приняты решения распределены между транспортными средствами и объектами транспортной инфраструктуры, что позволяет учитывать пользовательские предпочтения при построении маршрута, основываясь на данных о распределении транспортных потоков в сети.

В статье [15] предложена стратегия перестроения маршрута для каждого транспортного средства (агента) на основе многоагентного подхода, предназначенная для объезда непрогнозируемых дорожных заторов, возникающих из-за дорожных инцидентов. В [16] авторы использовали систему резервирования для управления транспортным потоком на перекрестках. В [17] прогнозировали координаты транспортных средств на горизонте прогноза в несколько минут, оценивали количество транспортных средств на сегментах дорожной сети и использовали эту информацию для выполнения процедуры маршрутизации.

Проблема дорожных заторов тесно связана с двумя фундаментальными понятиями в теории распределения транспортных потоков: пользовательское равновесие и системный оптимум, известные как принципы Вардроп [18]. Несколько работ было посвяще-

но нахождению системного оптимума в транспортной сети. В [19] изучается стратегия преодоления эгоистичной маршрутизации на основе многоагентной маршрутизации в предположении, что транспортные средства обмениваются данными о состоянии транспортных потоков. Системно-оптимальный подход с дополнительными ограничениями для соблюдения индивидуальных предпочтений водителей был предложен в [20]. В [21] для достижения системно-оптимального распределения транспортных потоков предложено использовать игровую модель Штакельберга. Однако рассмотренные алгоритмы нахождения системного оптимума являются вычислительно сложными и не могут быть использованы для маршрутизации транспортных средств в режиме реального времени.

В [22] предложен метод резервирования маршрутов, который заключается в разбиении сегментов дорожной сети на слоты в пространственной и временной областях и резервировании областей для каждого транспортного средства. В соответствии с этим методом, дорожной сегмент доступен для движения только в том случае, если количество зарезервированных слотов не превышает критическую плотность транспортного потока на сегменте. Однако время прохождения дорожного сегмента считается постоянным и не зависит от количества транспортных средств на сегменте. Схожий подход был использован в [23].

В данной работе рассматривается задача маршрутизации автономных транспортных средств в контексте интеллектуальной транспортной системы. Предполагается, что каждое транспортное средство взаимодействует с единой системой построения маршрутов. Исследуется метод маршрутизации, аналогичный предложенному в [22], однако предполагается, что скорость прохождения дорожных сегментов зависит от количества транспортных средств, зарезервировавших слоты на выбранном сегменте в выбранный момент времени. Кроме того, предложенная схема предполагает возможность перестроения маршрута в процессе движения.

Работа построена следующим образом. В первом параграфе приводится математическая формулировка решаемой проблемы. Во втором параграфе приводится описание предлагаемого решения. В третьем параграфе представлены постановка и результаты экспериментов, выполненных в системе микроскопического транспортного моделирования. В завершении работы представлены заключение, благодарности и список использованных источников.

1. Формулировка проблемы

Улично-дорожную сеть будем рассматривать как ориентированный граф $G=(V, E)$, в котором вершины V , $N_V=|V|$ соответствуют перекресткам дорожной сети, ребра E , $N_E=|E|$ соответствуют сегментам дорожной сети между перекрестками. Каждый дорожный сегмент $(i, j) \in E$, $i \in V$, $j \in V$ описывается следующими параметрами: длина дорожного сегмента λ_{ij} , число

полос N_{ij} , количество транспортных средств на сегменте r_{ij} , максимальное количество транспортных средств r_{ij}^{max} , соответствующее критической плотности потока на сегменте.

Пусть U – множество транспортных средств. Для каждого транспортного средства $u_k \in U$ считаются известными вершины отправления O_k и назначения D_k , а также время начала движения τ_k .

Задача нахождения наименьшего ожидаемого времени прибытия

Рассмотрим отдельное транспортное средство $u \in U$ с известными вершинами отправления-прибытия O, D и временем начала движения τ .

Пусть p_h обозначает h -й путь из вершины отправления O к вершине назначения D ,

$$p_h = (v_0^h, v_1^h), (v_1^h, v_2^h), \dots, (v_{L_h-1}^h, v_{L_h}^h),$$

где $v_j^h \in V$ – j -я посещённая вершина в h -м пути, $v_0^h = O, v_{L_h}^h = D, L_h$ – количество вершин в h -м пути.

Время прохождения дорожного сегмента $(v_i, v_j) \in E$ между вершинами $v_i \in V$ и $v_j \in V$ в момент времени t обозначим как $c_{v_i, v_j}(t)$.

Обозначим $d_{v_j}^h$ как время прибытия в вершину v_j при движении по пути p_h . Тогда время прибытия в каждую вершину может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} d_O^h &= \tau, \\ d_{v_0}^h &= d_O^h + c_{v_0, v_1^h}(d_O^h), \\ &\dots \\ d_D^h &= d_{v_{L_h-1}^h}^h + c_{v_{L_h-1}^h, D}(d_{v_{L_h-1}^h}^h). \end{aligned} \tag{1}$$

Тогда задача маршрутизации заключается в нахождении пути с наименьшим ожидаемым временем прибытия в вершину назначения и может быть записана как:

$$d_D^* = \min_{p_h} d_D^h. \tag{2}$$

2. Метод резервирования маршрутов

По сути, задача маршрутизации одного транспортного средства заключается в нахождении кратчайшего пути в зависящем от времени графе. Однако в рассматриваемой в работе задаче необходимо осуществлять маршрутизацию с учётом маршрутов движения других транспортных средств в транспортной сети.

Для решения этой задачи в работе предлагается использовать метод резервирования маршрутов в рамках интеллектуальной транспортной системы (ИТС). Каждый сегмент дорожной сети дискретизируется во временные интервалы с шагом дискретизации T_{discr} . Для каждого временного интервала хранится оценка количества транспортных средств, которые будут находиться на дорожном сегменте в выбран-

ный интервал времени при движении по заданному маршруту.

Общая схема процедуры маршрутизации, таким образом, состоит из следующих шагов:

1. Когда транспортное средство планирует начать поездку, оно отправляет в ИТС координаты точки отправления (текущего положения транспортного средства), координаты точки назначения и время начала поездки, чтобы получить маршрут движения.
2. Учитывая текущее состояние резервирования дорожных сегментов, ИТС решает задачу нахождения кратчайшего пути в зависящей от времени транспортной сети и возвращает путь движения транспортному средству.
3. Одновременно ИТС обновляет состояние резервирования каждого дорожного сегмента, входящего в кратчайший путь, для временных интервалов, в которых, как ожидается, транспортное средство будет находиться на выбранном сегменте, если будет следовать указанному маршруту с указанной скоростью движения. Скорость движения на дорожном сегменте рассчитывается исходя из текущего состояния резервирования.

Очевидно, что предположение о том, что все транспортные средства будут двигаться с указанной скоростью, является невыполнимым, поэтому на практике ожидаются значительные отклонения наблюдаемой дорожной ситуации от прогнозируемой.

Для уменьшения отклонения предлагается использовать процедуру перестроения маршрута в процессе движения. Такой подход применяется в моделях распределения транспортных потоков [24].

В следующем параграфе метод и алгоритм маршрутизации будут описаны более формально.

3. Алгоритм резервирования маршрутов

Обозначим $n_{ij}(t)$ как общее количество транспортных средств, зарезервировавших временной слот t на дорожном сегменте $(i, j) \in E$. Тогда переменная $p_{ij}(t) = n_{ij}(t) / (\lambda_{ij} N_{ij})$ обозначает мгновенную плотность транспортного потока на дорожном сегменте (i, j) в момент времени t .

Время прохождения дорожного сегмента $c_{v_i, v_j}(t)$ (и, соответственно, скорость) напрямую зависит от плотности транспортного потока на сегменте. В [25] приведён обзор основных детерминированных соотношений скорости и плотности транспортного потока. В данной работе для оценки скорости и времени прохождения дорожного сегмента использовалась линейная модель Гриншилда (Grinshield) c_{ij}^{Gr} (3), модель Андервуда (Underwood) c_{ij}^{Und} (4) и BPR-соотношение c_{ij}^{BPR} (5), являющееся стандартным соотношением в моделях распределения транспортных потоков [26].

$$c_{ij}^{Gr}(t) = t_{ij}^f / \left(1 - \frac{p_{ij}(t)}{p_{ij}^{jam}} \right), \tag{3}$$

$$c_{ij}^{Und}(t) = t_{ij}^f / \exp\left(-\frac{p_{ij}(t)}{p_{ij}^{jam}}\right), \quad (4)$$

$$c_{ij}^{BPR}(t) = t_{ij}^f \left(1 + \alpha \left(\frac{p_{ij}(t)}{p_{ij}^{jam}}\right)^\beta\right), \quad (5)$$

где t_{ij}^f – время прохождения дорожного сегмента в свободном потоке, p_{ij}^{jam} – плотность потока на дорожном сегменте (i, j) , соответствующая дорожному затору.

Введем дополнительное обозначение $T_{reroute}$ – интервал перестроения маршрута транспортного средства. Процедура маршрутизации состоит из двух частей: отправка координат текущего положения транспортного средства каждые $T_{reroute}$ секунд для построения / перестроения маршрута движения и непосредственно расчёт пути в ИТС.

Алгоритм резервирования маршрутов (RRA) состоит из следующих шагов (Алгоритм 1):

1. Если для выбранного транспортного средства маршрут движения был рассчитан – удалить транспортное средство из зарезервированного трафика на каждом сегменте, входящем в маршрут движения.
2. Рассчитать кратчайший путь между вершинами отправления и назначения, используя алгоритм A^* . Время прохождения дорожных сегментов рассчитывается исходя из накопленного трафика на сегменте с помощью выбранного соотношения скорости и плотности транспортного потока.
3. Обновить зарезервированный трафик для дорожных сегментов, входящих в новый маршрут движения.

В алгоритме используются следующие обозначения: τ_{in} и τ_{out} – время въезда на дорожный сегмент и время выезда с дорожного сегмента соответственно, $[z]$ – целая часть числа z , $A^*(O, D, n)$ – расчёт кратчайшего пути алгоритмом A^* из вершины O в вершину D с учётом состояния загрузки транспортной сети n .

Алгоритм 1. Алгоритм резервирования маршрутов (RRA)

Входные данные: O, D, τ, k

if $p_k \neq \emptyset$ **then** //Очистить зарезервированный трафик

for $(v_i, v_j) \in p_k$ **do**

$\tau_{in} = [d(v_i) / T_{discr}]$;

$\tau_{out} = [d(v_j) / T_{discr}]$;

for $t = \tau_{in}, \tau_{out}$ **do**

$n_{v_i, v_j}(t) = n_{v_i, v_j}(t) - 1$;

end for

end for

end if

$p_k = A^*(O, D, n)$; //Обновить маршрут

for $(v_i, v_j) \in p_k$ **do** //Обновить зарезервированный трафик

$\tau_{in} = [d(v_i) / T_{discr}]$;

$\tau_{out} = [d(v_j) / T_{discr}]$;

for $t = \tau_{in}, \tau_{out}$ **do**

$n_{v_i, v_j}(t) = n_{v_i, v_j}(t) + 1$;

end for

end for

4. Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований был выбран тестовый сценарий в нерегулируемой дорожной сети малого размера [27].

Для моделирования движения транспортных средств используется пакет микроскопического моделирования с открытым исходным кодом SUMO [28], предназначенный для моделирования интермодальных сценариев движения в крупномасштабных транспортных сетях. Для моделирования движения транспортных средств использовалась модель следования за лидером Краусса [29]. В работе использовались стандартные параметры модели: длина транспортного средства (ТС) – 5 метров, максимальная скорость – 15 м/с, ускорение – 2,5 м/с², торможение – 4,5 м/с², минимальное расстояние между ТС – 2,5 м.

Сравнение предлагаемого алгоритма с разными моделями оценки скорости прохождения дорожных сегментов (3)–(5) проводилось по критериям среднего времени движения и среднего времени задержки отправления. Задержка возникает, если при моделировании в указанное время отправления на сегменте недостаточно места для движения нового ТС, тогда это ТС добавляется в очередь, и попытка отправления будет выполнена на следующих итерациях моделирования.

На первом этапе экспериментов фиксировался интервал времени перестроения маршрутов $T_{reroute} = 15$ с и исследовалась зависимость от интервала дискретизации для разных соотношений скорости и плотности потока. Моделирование проводилось в режиме плотного движения с заторами для 84110 транспортных средств за один день. Результаты экспериментов показаны на рис. 1 и рис. 2.

По критерию среднего времени движения модели Андервуда и Гриншилда показали схожие результаты для интервала дискретизации меньше одной секунды, однако по критерию средней задержки времени отправления модель Гриншилда показала худший результат. Учитывая оба критерия в совокупности, результаты, полученные с использованием соотношения Андервуда скорости-плотности потока, превосходят результаты, полученные с использованием BPR-соотношения и модели Гриншилда.

Следующим этапом экспериментального анализа было исследование зависимости среднего времени поездки и задержки отправления для модели Андервуда в зависимости от интервала дискретизации для разных значений интервала времени перестроения маршрутов $T_{reroute}$ (в секундах). Среднее время поездки и средняя задержка отправления показаны на рис. 3 и рис. 4 соответственно.

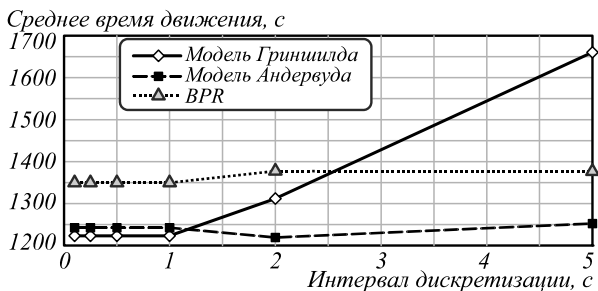


Рис. 1. Среднее время движения для различных соотношений скорости-плотности потока

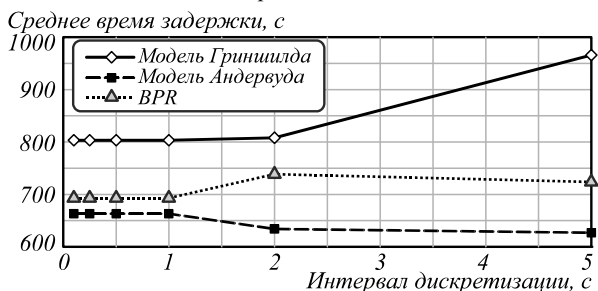


Рис. 2. Среднее время задержки отправления для различных соотношений скорости-плотности потока

Учитывая оба критерия в совокупности, лучшие результаты были показаны моделью с интервалом перестроения маршрута $T_{reroute} = 60$ с.

Далее было проведено сравнение результатов, полученных с помощью алгоритма резервирования маршрутов (RRA) с неконтролируемой динамической маршрутизацией, основанной на использовании текущей информации о состоянии транспортных потоков в сети.

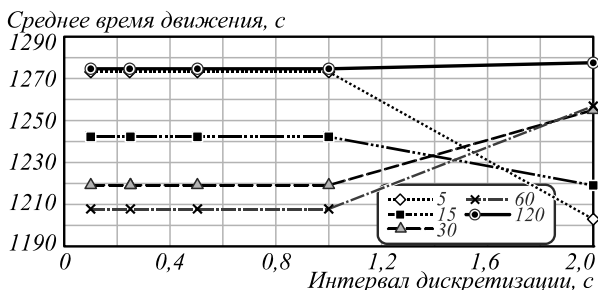


Рис. 3. Среднее время поездки для различных интервалов перестроения маршрута

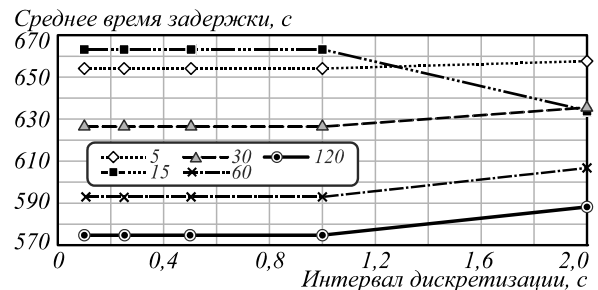


Рис. 4. Среднее время задержки отправления для различных интервалов перестроения маршрута

Табл. 1 показывает среднее время движения (в секундах) для различных интервалов перестроения маршрутов с фиксированным интервалом дискретизации $T_{discr} = 1$ секунда.

Табл. 1. Среднее время поездки в тестовой сети

$T_{reroute}$	5	15	30	60	120
RRA	1273,2	1242,2	1219,2	1207,9	1274,7
Динамическая маршрутизация	1388,3	1374,7	1416,0	1439,8	1410,4

Следующим этапом проведения экспериментов было сравнение быстродействия алгоритмов. Рис. 5 показывает среднее время моделирования сценария. Можно отметить, что время моделирования уменьшается при увеличении интервала дискретизации T_{discr} и увеличении интервала перестроения маршрута $T_{reroute}$.

На заключительном этапе экспериментального анализа было проведено сравнение алгоритма резервирования маршрутов ($T_{reroute} = 60$, $T_{discr} = 1$) с динамической маршрутизацией с использованием текущей информации в крупномасштабной транспортной сети. Для тестирования был выбран общедоступный сценарий «TAPAS Cologne» [30]. Для моделирования использовалась транспортная сеть г. Кёльн, содержащая 71368 дорожных сегментов. Рассматривался период моделирования в утренний час пик, с 6 до 9 утра.

Время моделирования, мин

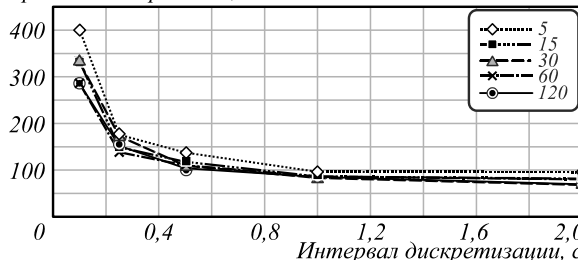


Рис. 5. Среднее время моделирования для различных интервалов перестроения маршрута

Среднее время поездки (в секундах) в зависимости от количества моделируемых транспортных средств (загрузки сети) показано в табл. 2.

Табл. 2. Среднее время поездки в крупномасштабной сети, с

Количество ТС	50547	75820	101093
RRA	589,2	626,3	677,1
Динамическая маршрутизация	618,1	641,5	678,1

Среднее время задержки отправления (в секундах) в зависимости от количества моделируемых транспортных средств показано в табл. 3.

Табл. 3. Среднее время задержки отправления в крупномасштабной сети, с

Количество ТС	50547	75820	101093
RRA	1,1	6,6	13,1
Динамическая маршрутизация	1,7	8,8	23,9

Предложенный алгоритм резервирования маршрутов показал лучшие результаты по критериям среднего времени поездки и средней задержки отправления по сравнению с динамической маршрутизацией транспортных средств.

Заключение

В работе проведено исследование алгоритма маршрутизации на основе метода резервирования маршрутов с возможностью перестроения маршрутов в ходе движения. Основным преимуществом рассмотренного метода является учёт загрузки дорожных сегментов в пространственной и временной областях, что позволяет прогнозировать трафик в сети и находить кратчайший путь с высокой точностью.

Результаты моделирования подтверждают, что результаты, полученные с помощью предложенного алгоритма резервирования маршрутов, превосходят результаты, показанные при неконтролируемой динамической маршрутизации.

Возможным направлением дальнейших исследований является учёт стохастического поведения водителей и, как следствие, использование стохастических алгоритмов нахождения маршрутов движения. Другим направлением исследования является учёт траектории движения транспортных средств для повышения точности оценки зарезервированного трафика на дорожных сегментах.

Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-07-00605 А, № 18-29-03135-мк в части «Метод/Алгоритм резервирования маршрутов», а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/ЧЗ363/26) в части «Экспериментальные исследования».

Литература

1. **Eskandarian, A.** Handbook of intelligent vehicles / A. Eskandarian. – New York: Springer, 2012. – 1599 p. – ISBN: 978-0-85729-084-7.
2. **Miculescu, D.** Polling-systems-based control of high-performance provably-safe autonomous intersections / D. Miculescu, S. Karaman // Proceedings of the 53rd IEEE Conference on Decision and Control. – 2014. – P. 1417-1423. – DOI: 10.1109/CDC.2014.7039600.
3. **Zhou, F.** Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part I: Theoretical analysis with generalized time geography / F. Zhou, X. Li, J. Ma // Transportation Research Part B: Methodological. – 2017. – Vol. 95(C). – P. 394-420. – DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.007.
4. **Varaiya, P.** Smart cars on smart roads: Problems of control / P. Varaiya // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1993. – Vol. 38, Issue 2. – P. 195-207. – DOI: 10.1109/9.250509.
5. **Paden, B.** A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles / B. Paden, M. Čáp, S.Z. Yong, D. Yershov, E. Frazzoli // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2016. – Vol. 1, Issue 1. – P. 33-55. – DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706.
6. **Dijkstra, E.W.** A note on two problems in connexion with graphs / E.W. Dijkstra // Numerische Mathematik. – 1959. – Vol. 1, Issue 1. – P. 269-271. – DOI: 10.1007/BF01386390.
7. **Hart, P.E.** A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths / P.E. Hart, N.J. Nilsson, B. Raphael // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. – 1968. – Vol. 4, Issue 2. – P. 100-107. – DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
8. **Goldberg, A.** Computing the shortest path: A search meets graph theory / A. Goldberg, C. Harrelson // Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA '05). – 2005. – P. 156-165.
9. **Geisberger, R.** Exact routing in large road networks using contraction hierarchies / R. Geisberger, P. Sanders, D. Schultes, C. Vetter // Transportation Science. – 2012. – Vol. 46, Issue 3. – P. 388-404. – DOI: 10.1287/trsc.1110.0401.
10. **Bast, H.** Route planning in transportation networks / H. Bast, D. Delling, A. Goldberg, M. Müller-Hannemann, T. Pajor, P. Sanders, D. Wagner, R.F. Werneck. – In: Algorithm Engineering / ed. by L. Kliemann, P. Sanders. – Cham: Springer, 2016. – P. 19-80. – DOI: 10.1007/978-3-319-49487-6_2.
11. **Çolak, S.** Understanding congested travel in urban areas / S. Çolak, A. Lima, M.C. González // Nature Communications. – 2016. – Vol. 7. – 10793. – DOI: 10.1038/ncomms10793.
12. **Schmitt, E.J.** Vehicle route guidance systems: Classification and comparison / E.J. Schmitt, H. Jula // 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. – 2006. – P. 242-247. – DOI: 10.1109/ITSC.2006.1706749.
13. **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.
14. **Desai, P.** Multi-agent based vehicular congestion management / P. Desai, S.W. Loke, A. Desai, J. Singh // 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – 2011. – P. 1031-1036. – DOI: 10.1109/IVS.2011.5940493.
15. **Wang, S.** A multi-agent based vehicles re-routing system for unexpected traffic congestion avoidance / S. Wang, S. Djahel, J. McManis // 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). – 2014. – P. 2541-2548. – DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958097.
16. **Dresner, K.** Sharing the road: Autonomous vehicles meet human drivers / K. Dresner, P. Stone // IJCAI'07 Proceedings of the 20th international joint conference on Artificial intelligence. – 2007. – P. 1263-1268.
17. **Kanamori, R.** A study of route assignment strategy based on anticipatory stigmergy / R. Kanamori, J. Takahashi, T. Ito // Electronics and Communications in Japan. – 2016. – Vol. 99, Issue 3. – P. 3-12. – DOI: 10.1002/ecj.11683.
18. **Wardrop, J.G.** Some theoretical aspects of road traffic research / J.G. Wardrop // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – Vol. 1, Issue 3. – P. 325-362. – DOI: 10.1680/ipeds.1952.11259.
19. **Hasan, M.R.** A multiagent solution to overcome selfish routing in transportation networks / M.R. Hasan, A.L.C. Bazzan, E. Friedman, A. Raja // 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). – 2016. – P. 1850-1855. – DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795856.
20. **Jahn, O.** System-optimal routing of traffic flows with user constraints in networks with congestion / O. Jahn, R.H. Möhring, A.S. Schulz, N.E. Stier-Moses // Operations Research. – 2005. – Vol. 53, Issue 4. – P. 600-616. – DOI: 10.1287/opre.1040.0197.
21. **Groot, N.** Toward system-optimal routing in traffic networks: A reverse stackelberg game approach / N. Groot, B. De Schutter, H. Hellendoorn // IEEE Transactions on In-

- telligent Transportation Systems. – 2015. – Vol. 16, Issue 1. – P. 29-40. – DOI: 10.1109/TITS.2014.2322312.
22. **Menelaou, C.** Controlling road congestion via a low-complexity route reservation approach / C. Menelaou, P. Kolios, S. Timotheou, C.G. Panayiotou, M.P. Polycarpou // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2017. – Vol. 81 – P. 118-136. – DOI: 10.1016/j.trc.2017.05.005.
23. **Agafonov, A.** Efficiency comparison of the routing algorithms used in centralized traffic management systems / A. Agafonov, V. Myasnikov // *Procedia Engineering*, – 2017. – Vol. 201. – P. 265-270. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.617.
24. **Saw, K.** Literature review of traffic assignment: static and dynamic / K. Saw, B.K. Katti, G. Joshi // *International Journal of Transportation Engineering*. – 2015. – Vol. 2, Issue 4. – P. 339-347. – DOI: 10.22119/ijte.2015.10447.
25. **Li, J.** Speed-density relationship: from deterministic to stochastic / J. Li, Q.-Y. Chen // *The 88th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting*. – 2009. – P. 1-20.
26. *Highway Capacity Manual*. – Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2000. – 1207 p. – ISBN: 0-309-06681-6.
27. **Chakirov, A.** Enriched sioux falls scenario with dynamic and disaggregate demand / A. Chakirov, P.J. Fourie // *ETH Zurich Research Collection*. – 2014. – 40 p. – DOI: 10.3929/ethz-b-000080996.
28. **Krajzewicz, D.** Recent development and applications of SUMO – Simulation of Urban MObility / D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, L. Bieker // *International Journal on Advances in Systems and Measurements*. – 2012. – Vol. 5, Issues 3&4. – P. 128-138.
29. **Krauss, S.** Metastable states in a microscopic model of traffic flow / S. Krauss, P. Wagner, C. Gawron // *Physical Review E*. – 1997. – Vol. 55, Issue 5. – P. 5597-5602. – DOI: 10.1103/PhysRevE.55.5597.
30. *Simulation of Urban MObility [Electronical Resource]*. – URL: https://sourceforge.net/projects/sumo/files/traffic_data/scenarios/TAPASCologne/ (request date 05.06.2018).

Сведения об авторах

Агафонов Антон Александрович, 1988 года рождения. В 2011 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ), в 2014 защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук. В настоящее время работает старшим научным сотрудником НИЛ-55 Самарского университета. Круг научных интересов включает геоинформационные технологии, транспортное моделирование, веб-технологии. Имеет 12 публикаций, из них 5 статей. E-mail: ant.agafonov@gmail.com.

Мясников Владислав Валерьевич, 1971 года рождения. В 1994 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ). В 1995 году поступил в аспирантуру СГАУ, в 1998 году защитил диссертацию на соискание степени кандидата технических наук, а в 2008 – диссертацию на соискание степени доктора физико-математических наук. В настоящее время работает ведущим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте систем обработки изображений РАН и одновременно профессором кафедры геоинформатики и информационной безопасности Самарского университета. Круг научных интересов включает цифровую обработку сигналов и изображений, компьютерное зрение, распознавание образов, искусственный интеллект и геоинформатику. Имеет более 200 публикаций, в том числе 100 статей и две монографии (в соавторстве). Член Российской ассоциации распознавания образов и анализа изображений. E-mail: vmyas@geosamara.ru.

ГРПТИ: 20.23.27

Поступила в редакцию 9 июня 2018 г. Окончательный вариант – 14 июня 2018 г.

NUMERICAL ROUTE RESERVATION METHOD IN THE GEOINFORMATIC TASK OF AUTONOMOUS VEHICLE ROUTING

A.A. Agafonov¹, V.V. Myasnikov^{1,2}

¹ Samara National Research University, Moskovskoye shosse 34, 443086, Samara, Russia,

² IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia

Abstract

Autonomous vehicle development is one of many trends that will affect future transport demands and planning needs. Autonomous vehicles management as a part of an intelligent transportation system could significantly reduce traffic jams and decrease the overall travel time. In this work, we investigate a route reservation architecture to manage road traffic within an urban area. The routing architecture decomposes road segments into time and spatial slots for every vehicle, it makes the reservation of appropriate slots on the road segments in the selected route. This approach allows one to predict the traffic in the road network and find the shortest path more precisely. We propose that a rerouting procedure should be utilized to improve the quality of the routing approach. We consider several speed-density relations to estimate the vehicle speed based on a road segment reservation state. The experimental study of the routing architecture is conducted using microscopic traffic simulation in SUMO package.

Keywords: route reservation approach, vehicle routing, shortest path, traffic simulation, SUMO.

Citation: Agafonov AA, Myasnikov VV. Numerical route reservation method in the geoinformatic task of autonomous vehicle routing. *Computer Optics* 2018; 42(5): 912-920. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-912-920.

Acknowledgements: The reported study was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research under research projects No. 18-07-00605 and 18-29-03135 (“Method/Algorithm for routes reservation”) and by the RF Ministry of Science and Higher Education within the State assignment to the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS under contract No. 007-GZ/Ch3363/26 (“Experimental studies”).

References

- [1] Eskandarian A. Handbook of intelligent vehicles. New York: Springer; 2012. ISBN: 978-0-85729-084-7.
- [2] Miculescu D, Karaman S. Polling-systems-based control of high-performance provably-safe autonomous intersections. *Proc 53rd IEEE Conference on Decision and Control* 2014: 1417-1423. DOI: 10.1109/CDC.2014.7039600.
- [3] Zhou F, Li X, Ma J. Parsimonious shooting heuristic for trajectory design of connected automated traffic part I: Theoretical analysis with generalized time geography. *Transportation Research Part B: Methodological* 2017; 95(C): 394-420. DOI: 10.1016/j.trb.2016.05.007.
- [4] Varaiya P. Smart cars on smart roads: Problems of control. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1993; 38(2): 195-207. DOI: 10.1109/9.250509.
- [5] Paden B, Čáp M, Yong SZ, Yershov D, Frazzoli E. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 2016; 1(1): 33-55. DOI: 10.1109/TIV.2016.2578706.
- [6] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1959; 1(1): 269-271. DOI: 10.1007/BF01386390.
- [7] Hart PE, Nilsson NJ, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 1968; 4(2): 100-107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- [8] Goldberg A, Harrelson C. Computing the Shortest Path: A Search Meets Graph Theory. *Proceedings of the Sixteenth Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA '05)* 2005: 156-165.
- [9] Geisberger R, Sanders P, Schultes D, Vetter C. Exact routing in large road networks using contraction hierarchies. *Transportation Science* 2012; 46(2): 388-404. DOI: 10.1287/trsc.1110.0401.
- [10] Bast H, Delling D, Goldberg A, Müller-Hannemann M, Pajor T, Sanders P, Wagner D, Werneck RF. Route planning in transportation networks. In Book: Kliemann L, Sanders P, eds. *Algorithm Engineering*. Cham: Springer; 2016: 19-80. DOI: 10.1007/978-3-319-49487-6_2.
- [11] Colak S, Lima A, González MC. Understanding congested travel in urban areas. *Nat Commun* 2016; 7: 10793. DOI: 10.1038/ncomms10793.
- [12] Schmitt EJ, Jula H. Vehicle route guidance systems: Classification and comparison. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference* 2006: 242-247. DOI: 10.1109/ITSC.2006.1706749.
- [13] Agafonov AA, Myasnikov VV. Method for the reliable shortest path search in time-dependent stochastic networks and its application to GIS-based traffic control [In Russian]. *Computer Optics* 2016; 40(2): 275-283. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-275-283.
- [14] Desai P, Loke SW, Desai A, Singh J. Multi-agent based vehicular congestion management. *2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* 2011: 1031-1036. DOI: 10.1109/IVS.2011.5940493.
- [15] Wang S, Djahel S, McManis J. A Multi-Agent based vehicles re-routing system for unexpected traffic congestion avoidance. *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* 2014: 2541-2548. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958097.
- [16] Dresner K, Stone P. Sharing the road: Autonomous vehicles meet human drivers. *IJCAI'07 Proceedings of the 20th international joint conference on Artificial intelligence* 2007: 1263-1268.
- [17] Kanamori R, Takahashi J, Ito T. A study of route assignment strategy based on anticipatory stigmergy. *Electronics and Communications in Japan* 2016; 99(3): 3-12. DOI: 10.1002/ecj.11683.
- [18] Wardrop JG. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 1952; 1(3): 325-362. DOI: 10.1680/ipeds.1952.11259.
- [19] Hasan MR, Bazzan ALC, Friedman E, Raja A. A multi-agent solution to overcome selfish routing in transportation networks. *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)* 2016: 1850-1855. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795856.
- [20] Jahn O, Möhring RH, Schulz AS, Stier-Moses NE. System-optimal routing of traffic flows with user constraints in networks with congestion. *Operations Research* 2005; 53(4): 600-616. DOI: 10.1287/opre.1040.0197.
- [21] Groot N, De Schutter B, Hellendoorn H. Toward system-optimal routing in traffic networks: A reverse stackelberg game approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2015; 16(1): 29-40. DOI: 10.1109/TITS.2014.2322312.
- [22] Menelaou C, Kolios P, Timotheou S, Panayiotou CG, Polycarpou MP. Controlling road congestion via a low-complexity route reservation approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2017; 81: 118-36. doi:10.1016/j.trc.2017.05.005.
- [23] Agafonov A, Myasnikov V. Efficiency comparison of the routing algorithms used in centralized traffic management systems. *Procedia Engineering* 2017; 201: 265-270. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.617.
- [24] Saw K, Katti BK, Joshi G. Literature review of traffic assignment: static and dynamic. *International Journal of Transportation Engineering* 2015; 2(4): 339-347. DOI: 10.22119/ijte.2015.10447.
- [25] Li J, Chen Q-Y. Speed-density relationship: from deterministic to stochastic. *The 88th Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting* 2009: 1-20.
- [26] Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council; 2000. ISBN: 0-309-06681-6.
- [27] Chakirov A, Fourie PJ. Enriched sioux falls scenario with dynamic and disaggregate demand. *ETH Zurich Research Collection* 2014. DOI: 10.3929/ethz-b-000080996.
- [28] Krajzewicz D, Erdmann J, Behrisch M, Bieker L. Recent Development and applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 2012; 5(3&4): 128-138.

[29] Krauss S, Wagner P, Gawron C. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E* 1997; 55(5): 5597-5602. DOI: 10.1103/PhysRevE.55.5597.

[30] Simulation of Urban MObility. Source: https://sourceforge.net/projects/sumo/files/traffic_data/enarios/TAPASCologne/.

Authors' information

Anton Aleksandrovich Agafonov (b. 1988) graduated from Samara State Aerospace University (SSAU) at 2011, received his PhD in Technical Sciences at 2014. At present, he is a researcher at Samara University. The area of interests includes geoinformatics, transport modelling and web-technologies. He's list of publications contains 12 publications, including 5 scientific papers. E-mail: ant.agafonov@gmail.ru .

Vladislav Valerievich Myasnikov (b. 1971) graduated (1994) from Samara State Aerospace University (SSAU). He received his PhD in Technical Sciences (1998) and DrSc degree in Physics & Maths (2008). He is a leading researcher at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences and holds a part-time position of Associate Professor at the Geoinformatics and Information Security Department at Samara University. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics, neural networks, computer vision, pattern recognition and artificial intelligence. He's list of publications contains about 200 scientific papers, including 100 articles and 2 monographs. He is a member of Russian Association of Pattern Recognition and Image Analysis. E-mail: vmyas@geosamara.ru .

Received June 9, 2018. The final version – June 14, 2018.
