

Построение маршрута движения на общественном транспорте с учетом индивидуальных предпочтений участников движения

А.А. Бородинов¹, А.С. Юмаганов¹, А.А. Агафонов¹

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

Аннотация. В настоящее время транспортные системы становятся все более сложными. Как следствие, усложняется и задача планирования маршрута движения от начальной точки до пункта назначения из-за многообразия выбора возможных вариантов движения. Зачастую, время движения является не единственным критерием выбора маршрута движения, потому важно учитывать индивидуальные предпочтения участников движения. Кроме того, для повышения точности оценки времени движения необходимо вместо статических сетей рассматривать зависящие от времени стохастические транспортные сети. В статье предлагается алгоритм расчета оптимального пути на общественном транспорте в стохастической сети с учетом прогнозной информации о времени прибытия транспортных средств и с использованием индивидуальных предпочтений участников движения. Экспериментальные исследования алгоритма проведены в крупномасштабной транспортной сети г. Самары с использованием реальных данных о движении общественного транспорта.

1. Введение

Повсеместный рост загрузки транспортных сетей, вызванный как увеличением числа транспортных средств в крупных мегаполисах, так и априорной неготовностью созданной в прошлом дорожной инфраструктуры к современным потокам, делает всё более актуальным решение навигационных задач, связанных с задачами выбора оптимального маршрута движения на личном и общественном транспорте. Существует множество систем и приложений для навигации (Яндекс.Навигатор и др.) Однако они работают с упрощенным статическим графом транспортной сети (вместо стохастического зависящего от времени графа), не учитывают прогнозную информацию о движении общественного транспорта при построении маршрутов движения, а также не рассматривают предпочтения пользователей для решения задач навигации. Все это приводит к тому, что принятие решений пользователем (особенно на привычных маршрутах движения) осуществляется по субъективным критериям и, зачастую, отличается от оптимального. Решение указанных проблем позволит сократить общее время транспортных корреспонденций в сети, повысить степень удовлетворенности пользователей и эффективность транспортной инфраструктуры в целом.

Статья построена следующим образом. В первом разделе кратко приводится обзор литературы по темам нахождения оптимального маршрута движения на общественном

транспорте в зависящих от времени детерминированным и стохастическим транспортным сетям. Во втором разделе приводится описание модели транспортной сети. Предлагаемый алгоритм расчета оптимального пути на общественном транспорте в стохастической сети с учетом прогнозной информации о времени прибытия транспортных средств и с использованием индивидуальных предпочтений участника движения приводится в третьем разделе. В четвертом разделе представлены постановка и результаты экспериментальных исследований предложенного алгоритма. В завершении работы представлены заключение и возможные направления дальнейших исследований.

2. Обзор литературы

Существующие системы навигации в основном работают со статическими транспортными сетями, т.е. предполагают, что время прохождения дорожных сегментов является постоянным и не зависит от времени дня, погодных условий и других факторов. Т.к. дорожная ситуация не является статичной, для повышения точности оценки времени движения необходимо учитывать динамические и стохастические характеристики транспортных потоков.

Обзор методов маршрутизации в зависящих от времени транспортных сетях приведен в [1]. Для ускорения алгоритмов маршрутизации использовалась иерархическая маршрутизация [2] и двунаправленный алгоритм A^* [3].

Многокритериальный алгоритм нахождения кратчайшего пути в стохастической сети A^* был представлен в [4]. В работе предполагалось, что значения времени прохождения соседних дорожных сегментов коррелированы.

Современные методы решения задачи навигации в стохастических зависящих от времени транспортных сетях моделируют время прохождения дорожных сегментов как случайную величину с функцией распределения, зависящей от времени [5, 6, 7].

Отдельной задачей является объединение надежности маршрута и ожидаемого времени движения. Большинство работ используют модель среднего риска [8, 9], которая учитывает среднее и дисперсию времени прохождения дорожных сегментов в рамках линейной целевой функции, которую необходимо оптимизировать. Коэффициенты целевой функции часто выбираются эвристически на основе экспериментальных исследований.

Основной проблемой в мультимодальных транспортных системах является комбинирование информации о различных режимах движения единым образом [10]. Наиболее распространенным подходом является построения графа транспортной сети, в котором различные маршруты движения соединены ребрами, означающими пересадки на остановочных пунктах.

Более того, при маршрутизации в мультимодальных транспортных системах необходимо учитывать важность индивидуальных предпочтений участников дорожного движения, т.к. зачастую время в пути является не единственным критерием выбора маршрута, и должны учитываться, в т.ч., количество пересадок, стоимость проезда, время ожидания транспортных средств и т.д. [11]. Поэтому для повышения точности решения задачи навигации должны быть использованы алгоритмы многокритериальной оптимизации.

Отдельным направлением исследований является нахождение оптимальной стратегии навигации, которая представляет собой иерархическое правило принятия решения о выборе дальнейшего маршрута движения на основе актуальных данных о движении пассажирского транспорта. Пространственные и временные зависимости стохастического времени прохождения дорожных сегментов исследованы в [12]. В статье [13] авторы включили актуальную информацию о движении транспортных средств в стратегию навигации. В работе [14] представлен алгоритм нахождения кратчайшего пути на общественном транспорте, учитывающий динамическую и стохастическую информации о движении

транспортных средств. Упор сделан на практическую реализацию алгоритма. В статье [15] представлен алгоритм маршрутизации, который учитывает одновременно стохастическое время прохождения дорожных сегментов и время ожидания транспортных средств и оптимизирует как скорость, так и надежность маршрутов.

В данной работе представлен алгоритм расчета оптимального пути на общественном транспорте в стохастической сети. В отличие от работ [14, 15], для учета времени ожидания используется не частота движения транспортных средств, а время прибытия на основе актуальной и прогнозной информации о движении транспортных средств. Кроме того, алгоритм учитывает пользовательские предпочтения при выборе параметров целевой функции оптимизации.

3. Модель транспортной сети

Транспортную сеть будем рассматривать как ориентированный граф $G = (N, E)$, вершины $n_i \in N$ которого соответствуют остановкам, ребра $e_{ij} \in E, i \in V, j \in V$ - сегментам транспортной сети с длиной $|e_{ij}|$, причем каждая остановка представляется как минимум тремя вершинами графа.

Введем следующие обозначения: S_k - остановка из множества S ; R_i - маршрут пассажирского транспорта из множества R .

Часть графа, представляющего два маршрута R_1 и R_2 , содержащих общую остановку S_k , показана на рисунке 1.

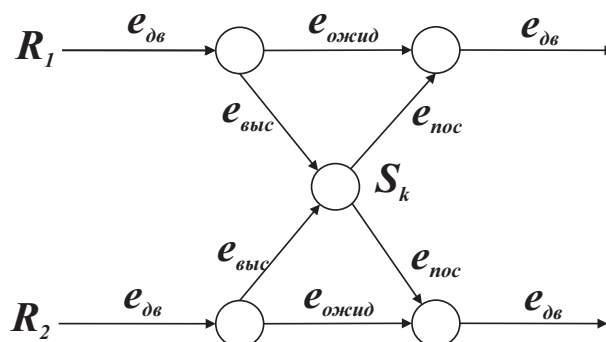


Рисунок 1. Структура графа маршрутной сети.

Граф содержит ребра нескольких типов:

- $e_{дв}$ - представляет участок маршрута между остановками характеризуется средним временем μ_{ij} и дисперсией прохождения σ_{ij} ;
- $e_{ожид}$ - ожидание посадки / высадки пассажиров на остановке, в работе в качестве веса ребра используется константное время ожидания;
- $e_{выс}$ - ребро высадки пассажиров, в работе в качестве веса ребра используется константное время высадки;
- $e_{пос}$ - ребро посадки (ожидания транспортного средства), определяется временем прибытия транспортного средства соответствующего маршрута на остановку;
- $e_{пеш}$ (не представлено на рисунке) - переход пешком от остановок до пунктов отправления / прибытия, вес ребра зависит от расстояния перехода;

Задача нахождения маршрута движения сводится к задаче нахождения кратчайшего пути в графе. Алгоритм решения задачи в зависимости от времени стохастической транспортной сети с учетом индивидуальных предпочтений участников движения представлен в следующем разделе.

4. Алгоритм нахождения кратчайшего пути

Для нахождения кратчайшего пути в зависящей от времени стохастической транспортной сети используется модифицированный алгоритм Дейкстры [14] (алгоритм 1).

В алгоритме в качестве метки вершины l_i используется пара $(n_i, cost_i)$, содержащая вершину n_i и многомерную цену маршрута $cost_i$, которую необходимо затратить для достижения вершины n_i из вершины отправления n_s . Цена маршрута представляется в виде пары $cost_i = (c_i, t_i)$, где c_i - обобщенная цена, t_i - время поездки.

Очередь с приоритетом pq определяет следующую вершину для просмотра на основе обобщенной цены c_i . Ассоциативные массивы $predMap$ и $costsMap$ используются для хранения предшествующей вершины для заданной и цены поездки до заданной вершины соответственно.

Алгоритм 1: Алгоритм нахождения кратчайшего пути

Входные данные: вершина отправления n_s , вершина прибытия n_d ,
время отправления t

Выходные данные: кратчайший путь

// Инициализация

PriorityQueue $pq = \emptyset$

Map $predMap = \emptyset$

Map $costsMap = \emptyset$

Label $l_s = Label(n_s, cost_s)$

$pq.insert(l_s)$

while $!pq = \emptyset$ **do**

 Label $l_i = pq.pop()$

$n_i = l_i.getNode()$

foreach $e_{ij} \in E$ **do**

$cost_j = calculateCost(e_{ij}, t + l_i.getCost().getTime())$

if $cost_j.getCost() > costsMap.get(n_i).getCost()$ **then**

 | continue;

end

$costsMap.put(n_j, cost_j)$

$predMap.put(n_j, n_i)$

 Label $l_j = Label(n_j, cost_j)$

$pq.insert(l_j)$

end

end

В алгоритме функции $getCost()$ и $getTime()$ - получение обобщенной цены c_i и времени t_i из цены достижения вершины $cost_i$ соответственно.

Основной интерес представляет функция получения оценки цены прохождения ребра графа $calculateCost()$. Предлагаемый способ определения цены ребра в зависимости от его типа описан в алгоритме 2. В алгоритме 2 используются следующие обозначения:

- $t_{wait} = 30$ (секунд) - время высадки / посадки;
- $t_{out} = 10$ (секунд) - время высадки;
- t_{arr} - прогнозируемое время прибытия транспортного средства на остановку;
- $s_{walk} = 1$ (м/с) - скорость движения пешком;
- $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ - параметры учета индивидуальных предпочтений, влияющие на выбор надежного пути, числа пересадок и расстояния пешком.

Алгоритм 2: *calculateCost*

Входные данные: ребро графа e_{ij} , время прибытия t в вершину i

Выходные данные: цена $cost_j = (c_j, t_j)$

```
if  $e_{ij}$  is  $e_{дв}$  then
    // сегмент маршрута между остановками
    return  $(\mu_{ij} + \alpha_0\sqrt{\sigma_{ij}}, \mu_{ij})$ ;
```

```
end
```

```
else if  $e_{ij}$  is  $e_{ожид}$  then
    // высадка / посадка
    return  $(t_{wait}, t_{wait})$ ;
```

```
end
```

```
else if  $e_{ij}$  is  $e_{выс}$  then
    // высадка
    return  $(t_{out}, t_{out})$ ;
```

```
end
```

```
else if  $e_{ij}$  is  $e_{пос}$  then
    // ожидание транспорта
    return  $(\alpha_1(t_{arr} - t), t_{arr} - t)$ ;
```

```
end
```

```
else if  $e_{ij}$  is  $e_{пеш}$  then
    // переход пешком
    return  $(\alpha_2|e_{ij}|/s_{walk}, |e_{ij}|/s_{walk})$ ;
```

```
end
```

5. Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования разработанного метода проводились для улично-дорожной сети г. Самары. Дорожная сеть состоит из 48139 сегментов. Для прогноза времени прибытия использовались данные о движении пассажирского транспорта автобусных маршрутов.

Для исследования качества работы алгоритма было выбрано 6 пар различных вершин отправления-прибытия на графе транспортной сети, после чего для каждой пары решали задачу нахождения пути на общественном транспорте, варьируя время отправления. Для сравнения качества прогнозирования использовались две стандартные метрики: средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) и средняя абсолютная ошибка (MAE).

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|t_i - \hat{t}_i|}{t_i} \times 100\%$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |t_i - \hat{t}_i|$$

где t_i - реальное значение времени прохождения маршрута, \hat{t}_i - прогнозное значение, N - количество экспериментов.

Среднее время поездки составило $t_{avg} = 2645$ секунд. По результатам экспериментального анализа были получены следующие значения метрик качества: $MAPE = 6.62\%$, $MAE = 179.8$ секунды. Полученные значения позволяют сделать вывод о хорошем качестве предложенного алгоритма.

6. Заключение

В работе представлен алгоритм расчета кратчайшего пути на общественном транспорте в стохастической зависящей от времени транспортной сети, учитывающей среднее время и дисперсию времени прохождения дорожного сегмента при построении маршрута движения. Предложенный алгоритм использует данные реального времени и прогнозные данные о движении транспортных средств для оценки времени ожидания общественного транспорта на остановочных пунктах. Параметры алгоритма выбираются с учетом индивидуальных пользовательских предпочтений участников дорожного движения.

Экспериментальный анализ предложенного алгоритма показал высокую точность оценки времени движения, близкую к реальному времени по выбранному маршруту.

Дальнейшее направление работ включает в себя сравнение предложенного алгоритма с другими алгоритмами решения задачи навигации, а также модификацию функции оценки веса ребра для повышения надежности найденного маршрута движения.

7. Литература

- [1] Delling, D. Time-dependent route planning / D. Delling, D. Wagner // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2009. – Vol. 5868. – P. 207-230. DOI: 10.1007/978-3-642-05465-5_8.
- [2] Delling, D. Core routing on dynamic time-dependent road networks / D. Delling, G. Nannicini // *INFORMS Journal on Computing*. – 2012. – Vol. 24(2). – P. 187-201. DOI: 10.1287/ijoc.1110.0448.
- [3] Nannicini, G. Bidirectional A* search on time-dependent road networks / G. Nannicini, D. Delling, D. Schultes, L. Liberti // *Networks*. – 2012. – Vol. 59(2). – P. 240-251. DOI: 10.1002/net.20438.
- [4] Chen, B. Reliable shortest path finding in stochastic networks with spatial correlated link travel times / B. Chen, W. Lam, A. Sumalee, Z.-l. Li // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2012. – Vol. 26(2). – P. 365-386. DOI: 10.1080/13658816.2011.598133.
- [5] Miller-Hooks, E. Least expected time paths in stochastic, time-varying transportation networks / E. Miller-Hooks, H. Mahmassani // *Transportation Science*. – 2000. – Vol. 34(2). – P. 198-215. DOI: 10.1287/trsc.34.2.198.12304.
- [6] Sun, S. How to find the optimal paths in stochastic time-dependent transportation networks? / S. Sun, Z. Duan, S. Sun, D. Yang // *17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC*. – 2014. – P. 2348-2353. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958066.
- [7] 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. – P. 275-283. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-275-283.
- [8] Lim, S. Practical route planning under delay uncertainty: Stochastic shortest path queries / S. Lim, C. Sommer, E. Nikolova, D. Rus // *Robotics: Science and Systems*. – 2013. – Vol. 8. – P. 249-256.
- [9] Nikolova, E. Approximation algorithms for reliable stochastic combinatorial optimization / E. Nikolova // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. – 2010. – Vol. 6302. – P. 338-351. DOI: 10.1007/978-3-642-15369-3_26.
- [10] Grasman, S. Dynamic approach to strategic and operational multimodal routing decisions / S. Grasman // *International Journal of Logistics Systems and Management*. – 2006. – Vol. 2(1). – P. 96-106. DOI: 10.1504/IJLSM.2006.008220.
- [11] Grabener, T. Time dependent multiobjective best path for multimodal urban routing / T. Grabener, A. Berro, Y. Duthen // *Electronic Notes in Discrete Mathematics*. – 2010. – Vol. 36(C). – P. 487-494. DOI: 10.1016/j.endm.2010.05.062.

- [12] Gao, S. Adaptive route choices in risky traffic networks: A prospect theory approach / S. Gao, E. Frejinger, M. Ben-Akiva // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. – 2010. – Vol. 18(5). – P. 727-740. DOI: 10.1016/j.trc.2009.08.001.
- [13] Wu, C. Adaptive route guidance based on real-time information in stochastic time-dependent transportation networks / C. Wu, X. Zhang, Y. Dong // *17th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. – 2014. – P. 2392-2397. DOI: 10.1109/ITSC.2014.6958073.
- [14] Demeyer, S. Dynamic and stochastic routing for multimodal transportation systems / S. Demeyer, P. Audenaert, M. Pickavet, P. Demeester // *IET Intelligent Transport Systems*. – 2014. – Vol. 8(2). – P. 112-123. DOI: 10.1049/iet-its.2012.0065.
- [15] Ni, P. DEPART: Dynamic Route Planning in Stochastic Time-Dependent Public Transit Networks / P. Ni, H. Vo, D. Dahlmeier // *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*. – 2015. – P. 1672-1677. DOI: 10.1109/ITSC.2015.271.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57518X0177).

Public transport route planning in the stochastic network based on the individual preferences of users

A.A. Borodinov¹, A.S. Yumaganov¹, A.A. Agafonov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. Nowadays transport systems becomes more and more complex. Therefore, passengers have difficulty with route planning due to the variety of possible ways to get from the starting point to the destination one. Since the travel time often not considered as single and main criteria by passengers, it is important to take into account their own preferences which may be very different. In this paper, we proposed a stochastic route planning algorithm, which consider the individual preferences of users. This method is based on the modified Dijkstra's algorithm. The proposed algorithm is tested using real public transport dataset obtained from the transportation network of Samara, Russia.