

Алгоритм оценки времени отправления общественного транспорта с использованием стратегий управления движением

А.А. Агафонов¹

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

Аннотация. Работа посвящена решению задачи построения прогноза времени выхода в рейс (отправления от начальной остановки маршрута) общественных транспортных средств. Задача построения прогноза рассматривается в двух постановках: оценка ожидаемого времени отправления и оценка интервала времени для выхода транспортного средства в рейс с заданной вероятностью. Рассматриваются алгоритмы прогнозирования, основанные на реальных данных мониторинга движения транспортных средств и планового расписания. Предложен оригинальный алгоритм прогнозирования, основанный на операционной стратегии управления движением транспортных средств. Проведено исследование описанных алгоритмов на данных движения городского пассажирского транспорта в г. Самаре.

1. Введение

Во многих городах городской пассажирский транспорт функционирует в условиях высокой неопределенности. Движение транспортных средств зависит от многих факторов, включая существующую дорожную ситуацию, пассажиропоток, поведение водителя и т.д. Несоблюдение расписания движения заставляет пассажиров учитывать риски при планировании маршрутов движения и в целом снижает эффективность использования транспортной инфраструктуры. Это особенно актуально для пассажирского транспорта, где расхождение с расписанием может накапливаться и приводить к скоплению транспортных средств, выполняющих один маршрут.

Основная цель данной работы состоит в решении задачи прогнозирования выхода транспортных средств в рейс с учетом планового расписания, мониторинга движения, а также с учетом возможного операционного управления движением транспортных средств.

Похожей задаче прогнозирования времени прибытия городского пассажирского транспорта на остановочные пункты посвящено большое количество работ. Существующая литература рассматривает различные статистические и метаэвристические методы прогнозирования, в том числе модели регрессии [1], искусственных нейронных сетей [2, 3], фильтра Калмана [4], метода опорных векторов [5, 6], гибридные методы [7, 8]. Однако рассмотренные методы в качестве базовой информации для прогноза времени прибытия используют информацию о времени прохождения дорожных сегментов в реальном времени и на основе архивных данных, поэтому не могут быть напрямую использованы для прогноза времени выхода транспортного средства в рейс.

Другой задачей, которую необходимо рассмотреть в контексте данного исследования, является задача составления расписания движения и оперативного управления движением транспортных средств [9]. Использование оперативного управления позволяет уменьшить расхождение между расписанием и реальным временем прибытия на остановочные пункты и не допустить скопления (bus bunching) транспортных средств на маршруте. Одной из наиболее популярных стратегий управления является стратегия выполнения расписания: если транспортное средство прибывает на остановку раньше запланированного времени, оно задерживается до планового времени отправления [10]. Другой стратегией является регулирование скорости движения между последовательными контрольными точками для соблюдения нормативного времени прибытия [11, 12].

В данной работе рассматривается задача оценки времени выхода городского общественного транспорта в рейс. Задача рассматривается в двух постановках: оценка ожидаемого времени отправления и оценка интервала времени отправления для выхода транспортного средства в рейс с заданной вероятностью. Работа построена следующим образом: во втором разделе вводятся основные обозначения и постановка задачи, рассматриваются алгоритмы оценки времени выхода в рейс на основе мониторинга и расписания движения, а также с учетом операционных стратегий управления транспортными средствами. В третьем разделе представлена постановка задачи оценки интервала времени отправления транспортных средств и представлен базовый алгоритм решения задачи. В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований. В завершении работы представлены заключение, благодарности и список использованных источников.

2. Оценка ожидаемого времени выхода в рейс

2.1. Основные обозначения

Введем следующие обозначения. Пусть

V - множество транспортных средств;

R - множество маршрутов движения;

I_r - порядковые номера рейсов на маршруте $r \in R$;

DT_i - время отправления (выхода в рейс) транспортного средства, выполняющего рейс $i \in I_r$ по маршруту $r \in R$;

DT_i^{sch} - нормативное время отправления транспортного средства, выполняющего рейс $i \in I_r$, согласно расписанию движения;

AT_i - время прибытия транспортного средства, выполняющего рейс $i \in I_r$, на терминальную остановку (конечную точку маршрута);

AT_i^{sch} - нормативное время прибытия транспортного средства, выполняющего рейс $i \in I_r$, на терминальную остановку согласно расписанию движения.

Пусть Δ_{min} - минимальное время простоя транспортного средства на терминальной станции (время между двумя последовательными рейсами).

Обозначим отклонение реального времени прибытия транспортного средства, выполняющего рейс $i \in I_r$, от нормативного времени прибытия как Δ_i^{arr} :

$$\Delta_i^{arr} = AT_i - AT_i^{sch}. \quad (1)$$

Нормативное время простоя между рейсами обозначим как Δ_i^{wait} :

$$\Delta_i^{wait} = DT_j^{sch} - AT_i^{sch}, \quad (2)$$

где $(i, j), i \in I_r, j \in I_r$ - порядковые номера последовательных рейсов, выполняемых транспортным средством $v \in V$ по маршруту $r \in R$.

Основной задачей является прогнозирование времени выхода DT_i транспортных средств в рейс, т.е. получение оценки

$$\hat{DT}_i, \forall i \in I_r, \forall r \in R. \quad (3)$$

В следующих подразделах будут рассмотрены алгоритмы оценки времени \hat{DT}_i на основе мониторинга движения, на основе стратегии выполнения расписания, а также с учетом стратегии предотвращения скопления транспортных средств на маршруте.

2.2. Оценка на основе мониторинга движения

Базовый алгоритм оценки \hat{DT}_i опирается на мониторинг движения транспортных средств с учетом планового расписания. основополагающее предположение алгоритма заключается в том, что последнее отклонение от нормативного времени прибытия будет сохраняться и при выходе транспортного средства в рейс.

Пусть $(i, j), i \in I_r, j \in I_r$ - порядковые номера последовательных рейсов, выполняемых транспортным средством $v \in V$ по маршруту $r \in R$. Тогда оценка времени выхода в рейс j будет иметь вид:

$$\hat{DT}_j = DT_j^{sch} + \Delta_i^{arr}. \quad (4)$$

2.3. Оценка на основе стратегии выполнения расписания

Базовый алгоритм на основе мониторинга движения не учитывает возможного управления движением транспортных средств диспетчерскими службами с целью соблюдения расписания движения.

Для учета стратегии управления в оценке времени выхода в рейс предлагается использовать время отклонения от расписания Δ_i^{arr} и нормативное время простоя между рейсами Δ_i^{wait} следующим образом:

$$\hat{DT}_j = \begin{cases} AT_i + \Delta_{min}, & \Delta_{wait} < 0, \\ DT_j^{sch} + \alpha \Delta_i^{arr}, & \Delta_i^{arr} < 0, \\ DT_j^{sch} + \max(0, \beta \Delta_i^{arr} - \gamma \Delta_i^{wait}), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (5)$$

где $(i, j), i \in I_r, j \in I_r$ - порядковые номера последовательных рейсов, выполняемых транспортным средством $v \in V$ по маршруту $r \in R$, $\alpha \in [0, 1], \beta \in [0, 1], \gamma \in [0, 1]$ - коэффициенты стратегии управления.

Предложенный учет стратегии управления состоит из следующих действий:

- если транспортное средство прибыло на терминальную остановку позже нормативного времени выезда в следующий рейс - сократить время ожидания до минимума;
- если транспортное средство прибыло раньше нормативного времени прибытия - сократить отклонение от нормативного времени выезда за счет увеличения времени простоя;
- в противном случае сократить отклонения от нормативного времени выезда за счет уменьшения времени простоя между рейсами.

2.4. Учет стратегии предотвращения скопления транспортных средств

Для предотвращения скопления транспортных средств на маршруте будем учитывать минимальную задержку между выходами в рейс транспортных средств одного маршрута.

Будем считать, что минимальное время задержки может быть разным для разных маршрутов движения и определяется исходя из расписания движения транспортных средств.

Обозначим задержку как $\Delta_r^{route}, r \in R$. Тогда оценка времени выхода в рейс $j \in R$ транспортного средства $v \in V$ на маршруте $r \in R$ примет вид:

$$\hat{DT}_j = \max(\hat{DT}_j, DT_k + \Delta_r^{route}), \quad (6)$$

где k - порядковый номер последнего выполняемого рейса, \hat{DT}_j - оценка времени выхода в рейс, полученная с помощью алгоритма на основе стратегии выполнения расписания.

Экспериментальное исследование предложенных алгоритмов оценки времени выхода транспортных средств в рейс приводится в разделе 4.

3. Оценка интервала отправления

Описанная в предыдущем разделе постановка задачи оценки может не всегда быть подходящей для пассажиров. Зачастую для участника дорожного движения важно знать не точную оценку времени отправления, а интервал времени, который обеспечит заданную вероятность отправления транспортного средства.

Пусть τ - момент требуемого времени отправления, p - заданная вероятность отправления, r - требуемый маршрут. Задача оценки интервала отправления может быть записана в следующем виде:

$$P(\tau - \Delta^{dep} < DT_i < \tau) > p, \quad (7)$$

где DT_i - время выхода транспортного средства в рейс, Δ^{dep} - искомый интервал отправления.

Базовый алгоритм оценки интервала Δ^{dep} основывается на использовании статистики движения транспортных средств.

Пусть $\Pi_r^d = \{DT_i, i \in I_r\}$ - множество записей о времени выхода транспортных средств $v \in V$ на рейсы маршрута $r \in R$ в день d , $\Pi_r = \{\Pi_r^d\}_{d=1}^N$ - статистика за N дней.

Введем переменную-индикатор следующего вида

$$p(d, \tau, \Delta) = \begin{cases} 1, & \exists DT_i \in \Pi_r^d : \tau - \Delta < DT_i < \tau; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (8)$$

Тогда алгоритм оценки интервала движения может быть записан в следующем виде:

Алгоритм 1: Оценка интервала движения

```

 $\hat{p} = 0;$ 
 $\Delta = 0;$ 
while  $\hat{p} < p$  do
  |  $\Delta = \Delta + step;$  //  $step$  - шаг приращения интервала
  |  $\hat{p} = \sum_{d=1}^N p(d, \tau, \Delta) / N;$ 
end
 $\Delta^{dep} = \Delta;$ 

```

4. Эксперименты

Экспериментальное исследование алгоритмов было проведено на данных о движении городского пассажирского транспорта в г. Самара. Для оценки времени выхода транспортных средств в рейс было выбрано 1070 рейсов различных автобусных маршрутов, для которых известно время отправления / прибытия на контрольные точки маршрута по расписанию.

В первую очередь была проведена оценка отклонения реального времени прибытия транспортных средств на терминальную вершину маршрута от нормативного времени прибытия по расписанию. Гистограмма отклонения времени прибытия показана на

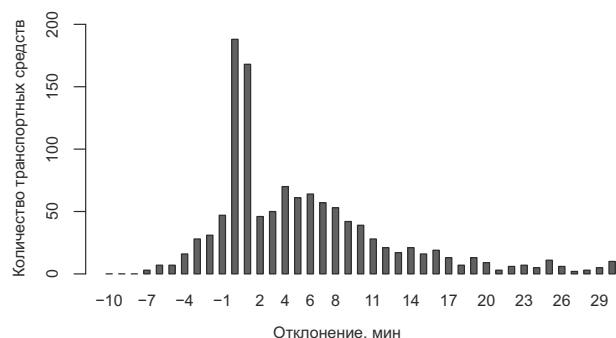


Рисунок 1. Отклонение времени прибытия транспортных средств

рисунке 1. Положительное отклонение показывает опаздывание транспортных средств, отрицательное - прибытие с опережением графика. Как видно из графика, транспортные средства чаще движутся с отставанием от графика.

Далее были проведены эксперименты по оценке качества предложенных алгоритмов оценки времени отправления. Алгоритмы сравнивались по критериям СКО и средней абсолютной ошибки. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение алгоритмов оценки времени выхода в рейс

	Средняя абсолютная ошибка	СКО
Оценка на основе мониторинга движения	601.0	1147.35
Оценка на основе стратегии выполнения расписания	249.95	385.22
Оценка на основе стратегии предотвращения скопления	260.85	377.78

Лучшие результаты показал алгоритм на основе стратегии выполнения расписания. Учет стратегии предотвращения скопления транспортных средств не улучшил оценку прогноза.

Заключительным этапом исследования являлось отклонение реального времени отправления транспортных средств от оцененного времени выхода в рейс. Гистограмма отклонения оценки времени отправления показана на рисунке 2. Положительное отклонение означает, что транспортное средство выехало позже оцененного времени отправления.

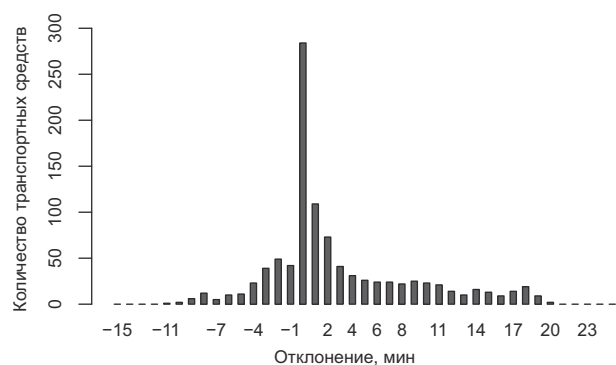


Рисунок 2. Отклонение оценки времени отправления

5. Заключение

В данной работе рассмотрена задача оценки времени выхода в рейс городского пассажирского транспорта. Рассмотрены алгоритмы оценки ожидаемого времени отправления на основе планового расписания и мониторинга движения, а также с учетом стратегий операционного управления движением транспортных средств. Лучший результат по выбранным критериям показал алгоритм на основе стратегии выполнения расписания.

К недостаткам рассмотренных алгоритмов следует отнести отсутствие учета статистики движения в оценке времени отправления.

Кроме того, была рассмотрена задача оценки интервала времени отправления для выхода транспортного средства в рейс с заданной вероятностью, и представлен базовый алгоритм ее решения. Разработка более сложных алгоритмов решения данной задачи является направлением дальнейших исследований.

6. Благодарности

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 16-37-00055-мол-а.

7. Литература

- [1] Агафонов, А.А. Прогнозирование параметров движения городского пассажирского транспорта по данным спутникового мониторинга / А.А. Агафонов, А.В. Сергеев, А.В. Чернов // Компьютерная оптика. — 2012. — Т. 36(3). — С. 453–458.
- [2] Chien, S.-J. Dynamic bus arrival time prediction with artificial neural networks / S.I.-J. Chien, Y. Ding, C. Wei // Journal of Transportation Engineering. — 2002. — Vol. 128, no. 5. — P. 429–438.
- [3] Chen, M. A dynamic bus-arrival time prediction model based on apc data / M. Chen, X. Liu, J. Xia, S.I. Chien // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. — 2004. — Vol. 19, no. 5. — P. 364–376.
- [4] Vanajakshi, L. Travel time prediction under heterogeneous traffic conditions using global positioning system data from buses / L. Vanajakshi, S.C. Subramanian, R. Sivanandan // IET Intelligent Transport Systems. — 2009. — Vol. 3, no. 1. — P. 1–9.
- [5] Yu, B. Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes / B. Yu, W.H.K. Lam, M.L. Tam // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2011. — Vol. 19, no. 6. — P. 1157–1170.
- [6] Bin, Y. Bus arrival time prediction using support vector machines / Y. Bin, Y. Zhongzhen, Y. Baozhen // Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations. — 2006. — Vol. 10, no. 4. — P. 151–158.
- [7] Park, T. A bayesian approach for estimating link travel time on urban arterial road network / T. Park, S. Lee // Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics). — 2004. — Vol. 3043. — P. 1017–1025.
- [8] Агафонов, А.А. Алгоритм оценки времени прибытия общественного транспорта с использованием адаптивной композиции элементарных прогнозов / А.А. Агафонов, В.В. Мясников // Компьютерная оптика. — 2014. — Т. 38(2). — С. 356–368.
- [9] Wu, Y. Comparative analysis of operation strategies in schedule design for a fixed bus route / Y. Wu, J. Tang, X. Luo // International Transactions in Operational Research. — 2015. — Vol. 22, no. 3. — P. 545–562.
- [10] Cats, O. Bus-holding control strategies / O. Cats, A.N. Larijani, et al. // Transportation Research Record. — 2012. — no. 2274. — P. 100–108.
- [11] Kalaputapu, R. Modeling schedule deviations of buses using automatic vehicle-location data and artificial neural networks / Ravi Kalaputapu, Michael J. Demetsky // Transportation Research Record. — 1995. — no. 1497. — P. 44–52.
- [12] Yan, Y. Robust optimization model of schedule design for a fixed bus route / Y. Yan, Q. Meng, S. Wang, X. Guo // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2012. — Vol. 25. — P. 113–121.

An algorithm for public transport departure time estimation on the basis of operation strategies

A.A. Agafonov¹

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

Abstract. In this paper we consider a problem of public transport departure time prediction. The problem is considered in two notations: estimation of the mean expected departure time and minimizing travel time interval required to ensure a predefined probability of departure on-time. We consider algorithms based on schedule and monitoring data. We propose an algorithm based on operation strategies for public transport management. The algorithms were tested by applying it on bus lines in Samara, Russia.

Keywords: public transport, departure time prediction, operation strategies.