

УДК 656.121.014:519.217

<https://doi.org/10.18503/2222-9396-2018-8-2-29-37>

# АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МОМЕНТОВ ВРЕМЕНИ ПРИБЫТИЯ ГОРОДСКИХ ПАССАЖИРСКИХ АВТОБУСОВ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКИХ ЦЕПЕЙ

Тьянь Ю.<sup>1</sup>, Рахмангулов А.Н.<sup>2</sup>, Муравьев Д.С.<sup>2,3</sup>, Ван С.<sup>1</sup><sup>1</sup> Харбинский политехнический университет, КНР<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия<sup>3</sup> Шанхайский университет транспорта, КНР

## Аннотация

Развитие общественного транспорта является эффективным способом уменьшения заторов на улично-дорожной сети и повышения эффективности перевозок пассажиров в городах. Повышение качества городских автобусных перевозок способствует привлечению большего числа пассажиров. В случае, если момент времени прибытия автобусов на остановочные пункты не прогнозируется, автобусы движутся с нарушением графика, что вызывает беспокойство у пассажиров. Это является одним из факторов снижения качества пассажирских транспортных услуг. В настоящей статье представлен метод прогнозирования моментов времени прибытия автобусов на остановочные пункты на основе цепей Маркова, учитывающий пространственно-временные характеристики движения автобусов. Предлагаемый метод прогнозирования позволяет упростить планирование пассажирами маршрута их передвижения по УДС и сократить время ожидания на остановочных пунктах. Разработанный алгоритм прогнозирования прибытия автобусов на остановочные пункты апробирован на реальных данных автобусного маршрута №114 (г. Харбин, КНР). Преимуществами предлагаемого метода являются малая погрешность результатов прогнозирования, а также простота использования метода и алгоритма его реализации.

**Ключевые слова:** моменты времени прибытия автобусов, остановочные пункты, прогнозирование, цепи Маркова, GPS.

## 1. Введение\*

В настоящее время проблема повышения безопасности и экологичности дорожного движения в городах становится все более актуальной. Заторы на улично-дорожной сети (УДС), дорожно-транспортные происшествия, загрязнение окружающей среды выбросами от транспортных средств, потребление энергетических ресурсов являются насущными проблемами крупных городов. Городской пассажирский транспорт имеет ряд преимуществ в условиях его использования в крупных городах: большая провозная способность и транспортная эффективность; низкое потребление энергетических ресурсов; относительно небольшие объемы выбросов в окружающую среду; низкая стоимость перевозки.

Достоверные прогнозы моментов времени прибытия транспортных средств, в частности автобусов, на остановочные пункты являются основополагающими данными, необходимыми для формирования информационных сообщений о движении автобусов в режиме реального времени, для оперативной корректировки расписания и маршрутов движения автобусов, а также для решения других задач управления автобусными пассажирскими перевозками. В настоящее время во многих городах КНР на автобусных остановочных пунктах установлены «умные» элек-

тронные табло, информирующие о различных услугах городского транспорта, а также проведены исследования эффективности применения технологии информационных табло. Основными элементами данной технологии являются: электронные табло, показывающие дистанцию между автобусами и остановочным пунктом, а также моменты времени прибытия автобусов различных маршрутов на остановочный пункт; информационная система, представляющая пользователям в режиме реального времени через мобильное приложение различную информацию об услугах городского пассажирского транспорта: наличие автобусов на линии; местонахождение каждого автобуса; время прибытия автобусов на остановочные пункты; рациональный транзитный маршрут с учетом времени ожидания автобуса на пересадочном пункте.

Однако в полном объеме технология умных электронных табло реализована лишь в нескольких городах КНР. В большинстве случаев информационная система городского пассажирского транспорта предоставляет лишь данные о схеме маршрутов движения городского пассажирского транспорта и расстояниях между остановочными пунктами. Основная причина медленного внедрения системы прогнозирования моментов времени прибытия автобусов на остановочные пункты заключается в воздействии на транспортный процесс большого числа внутренних и внешних факторов, таких, например, как повышение уровня автомобилизации населения, аварийные

© Тьянь Ю., Рахмангулов А.Н., Муравьев Д.С., Ван С., 2018.

ситуации, скопления на остановочных пунктах автобусов разных маршрутов. В таких условиях погрешность прогнозирования может достигать до 200%.

Результаты опроса пассажиров показывают наличие потребности как в точной информации о моментах времени прибытия транспортных средств на остановочные пункты, так и в регулярности городских пассажирских перевозок. Если фактический момент времени прибытия автобуса значительно превышает прогнозный, то это приводит к скоплению пассажиров на остановочных пунктах, снижает привлекательность общественного транспорта [1].

Известные методы прогнозирования моментов времени прибытия автобусов на остановочные пункты используют исторические (накопленные) и оперативные данные о движении автобусов на маршрутах в режиме реального времени. В качестве методов прогнозирования используется т.н. взвешенный метод, разработанный профессором Сун [2], а также методы нейронных сетей [3, 4], алгоритм фильтра Кальмана [5, 6], модели метода опорных векторов (Support Vector Machine – SVM) [7] и другие методы анализа больших объемов данных.

## 2 Алгоритм прогнозирования моментов времени прибытия автобуса на остановочные пункты на основе цепей Маркова

### 2.1 Обоснование алгоритма прогнозирования

Движение автобуса по маршруту характеризуется временными и пространственными параметрами и зависит от различных факторов, например, от погодных условий, качества дорожного покрытия и т.д. На коротком интервале времени скорость движения автобусов зависит от движущихся впереди транспортных средств, в том числе и других пассажирских автобусов. Если автобус движется с соблюдением расписания между двумя остановочными пунктами, то, при отсутствии негативного воздействия внешних факторов, он продолжит движение по расписанию и далее. Если же произошла задержка, то на следующем участке автобус может двигаться с большей скоростью для соблюдения расписания. Таким образом, множество данных о времени движения автобусов различных маршрутов между остановочными пунктами может быть использовано для описания состояния маршрутной системы движения автобусов, а серии таких данных описывают состояние системы на разных временных интервалах. Поэтому для расчёта времени движения автобусов между остановочными пунктами предлагается использовать метод прогнозирования состояний дискретной системы [8], основанный на теории Марковских цепей, а прогноз моментов времени прибытия автобусов на остановочные пункты осуществлять с использованием полученных значений времени движения автобусов по отдельным участкам маршрута.

Движение автобуса по маршруту можно описать последовательностью перехода из одного состояния в другое. Вероятность движения автобуса на определённом участке маршрута (между двумя соседними

остановочными пунктами) зависит только от скорости движения автобуса на предшествующем участке, что согласуется с основной идеей Марковских цепей. Разработанный авторами алгоритм прогнозирования основан на следующих предположениях:

1. Время движения автобуса определённого маршрута между остановочными пунктами в одном направлении описывается Марковским процессом.

2. Вероятность изменения времени движения автобуса между определёнными остановочными пунктами на определённом маршруте остаётся постоянной в течение заданного интервала времени, что позволяет упростить матрицу Марковских переходов.

### 2.2 Описание алгоритма прогнозирования

Для серий зависимых случайных величин была использована Марковская цепь с заданными интервалом времени и начальным распределением, с последующим расчётом будущего состояния, что является основой прогнозирования моментов времени прибытия автобусов на остановочные пункты. Предлагаемый алгоритм прогнозирования состоит из следующих шагов:

1. Разделение продолжительности работы транспортного средства на периоды  $T$ . Примем продолжительность одного временного периода равным одному часу, т.е. время работы автобуса на линии с 5:00 до 21:00 делится на 16 периодов.

2. Построение матрицы переходов. Значения матрицы переходов являются результатом статистической обработки накопленных геоанализов, полученных с GPS-приемников автобусов, работающих на маршруте. Для каждого временного периода работы автобуса собирались статистические данные о движении автобуса между тремя соседними остановочными пунктами  $a, b, c$  с последующим расчётом времени  $t_{ab}, t_{bc}$  (рис. 1).

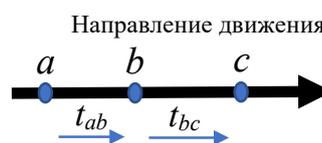


Рис. 1. Схема определения времени движения автобусов между соседними остановочными пунктами

Распределения вероятностей по состояниям цепи рассчитывались на основе статистической обработки пар значений времени движения автобусов между тремя соседними остановочными пунктами ( $t_{ab}, t_{bc}$ ), расположенными на маршруте  $L$ . Например, запись (255s, 350s) указывает на то, что время движения между остановочными пунктами  $a$  и  $b$  составляет 255 секунд и 350 секунд между остановочными пунктами  $b$  и  $c$ . В результате статистической обработки выборок значений ( $t_{ab}, t_{bc}$ ) получается матрица переходов времени движения автобуса между остановочными пунктами для периода времени  $T$

$$\begin{matrix}
 & t_{bc0} & t_{bc1} & \dots & t_{bc\ n-1} \\
 t_{ab0} & P_{00} & P_{01} & \dots & P_{0\ n-1} \\
 t_{ab1} & P_{10} & P_{11} & \dots & P_{1\ n-1} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 t_{ab\ n-1} & P_{n-10} & P_{n-11} & \dots & P_{n-1\ n-1}
 \end{matrix} \quad (1)$$

3. Расчёт времени прибытия автобуса. Когда транспортное средство прибывает на остановочный пункт *b*, время движения автобуса между остановочными пунктами *a* и *b* является известным. Тогда время движения автобуса между остановочными пунктами *b* и *c* с использованием матрицы переходов (1) рассчитывается по формуле

$$t_{bc} = \sum_{j=0}^{n-1} P_{ij} t_{bcj}. \quad (2)$$

Момент времени прибытия автобуса на остановочный пункт *c* ( $t_{arrive\ c}$ ) рассчитывается как

$$t_{arrive\ c} = t_{arrive\ b} + t_{bc}, \quad (3)$$

где  $t_{arrive\ b}$  – момент времени прибытия автобуса на остановочный пункт *b*.

### 3. Апробация алгоритма

#### 3.1 Исходные данные

Для выполнения апробации разработанного алгоритма использовался набор GPS-данных за 2012 год, предоставленный автобусным бюро г. Харбин (КНР). Из более чем 100 городских автобусных маршрутов в

городе Харбин был выбран маршрут №114 по направлению от Института сахарной промышленности (Sugar industry institute) до площади Ченгде (Chengde square). Для верификации разработанного алгоритма использовались GPS-данные, полученные в период с 3.12.2012 по 7.12.2012, а для последующего эксперимента и прогнозирования моментов времени прибытия автобуса на остановочные пункты – данные за 10.12.2012 в интервале времени с 9:00 до 10:00. Эксперимент проводился для трех выбранных остановочных пунктов: Третья улица Хесинг (Hexing 3rd Street), улица Хесинг (Hexing Road), улица Сидажу (Xidazhi Street).

На **рис. 2** показан фрагмент базы данных в системе Oracle, содержащей исходные данные для расчётов. Поле «O\_LINENO» содержит номер автобусного маршрута, «O\_BUSNAME» – номер автобуса, «O\_ARRIVETIME» – время прибытия на остановочный пункт, «O\_LEAVEITIME» – фактическое время отправления с остановочного пункта, «O\_UP» – код направления движения, «O\_STATIONNO» – номер остановочного пункта.

На **рис. 3** представлена схема автобусных маршрутов г. Харбин, которая была использована для сопоставления GPS-данных и проведения последующего эксперимента.

Из общего набора данных для 114 маршрута были извлечены данные для трех выбранных остановочных пунктов. Для упрощения матрицы переходов и последующих расчетов периоды времени *T* были заменены одним значением. Например, период времени 2'01-2'30 заменяется на 2 '15, а 2'31-3'00 – на 2' 45 и т. д. Результат построения матрицы переходов представлен в **табл. 1**.

列	数据	约束条件	授权	统计信息	触发器	闪回	相关性	详细资料	分区	索引	SQL
	O_LINE...	O_BUSNAME	O_ARRIVEDATE	O_ARRIVETIME	O_LEAVEITIME	O_UP	O_STATIONNO				
1	114	3284	2012-12-01	05:24:13	05:24:32	1	33				
2	114	3284	2012-12-01	05:24:47	05:24:58	1	34				
3	114	3293	2012-12-01	05:37:49	05:37:58	1	33				
4	114	3293	2012-12-01	05:38:15	05:38:32	1	34				
5	114	3288	2012-12-01	05:51:16	05:51:26	1	34				
6	114	3341	2012-12-01	05:51:24	05:51:45	1	2				
7	114	3341	2012-12-01	05:52:14	05:52:28	1	3				
8	114	3299	2012-12-01	05:50:54	05:50:57	1	34				
9	114	3288	2012-12-01	05:50:56	05:51:06	1	33				
10	114	3341	2012-12-01	05:55:23	05:55:45	1	5				
11	114	3341	2012-12-01	05:52:52	05:53:19	1	4				
12	114	3282	2012-12-01	05:53:29	05:53:39	1	33				
13	114	3282	2012-12-01	05:53:50	05:54:00	1	34				
14	114	3341	2012-12-01	05:59:01	05:59:33	1	8				
15	114	3341	2012-12-01	05:56:22	05:56:52	1	6				
16	114	3341	2012-12-01	05:57:36	05:58:02	1	7				
17	114	3293	2012-12-01	05:40:09	05:59:45	0	1				

Рис. 2. Формат представления исходных GPS-данных



Рис. 3. Схема автобусных маршрутов г. Харбин (КНР)

Таблица 1

Матрица переходов

Время	2'45	3'15	3'45	4'15	4'45	5'15	5'45	6'15	6'45	7'15	7'45
2'15	0.25	0.00	0.50	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2'45	0.09	0.00	0.00	0.18	0.18	0.27	0.18	0.00	0.00	0.00	0.09
3'15	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.43	0.29	0.00	0.00	0.14	0.00
3'45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.33	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
4'15	0.00	0.00	0.00	0.20	0.20	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.20
4'45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5'15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.50	0.00	0.00	0.00	0.25

Фактические данные о движении автобусов по маршруту №114 в 9 часов утра 10.12.2012 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Фактические данные о движении автобусов по маршруту №114, г. Харбин, КНР

Третья улица Хесинг-улица Хесинг	улица Хесинг-улица Сидаж
2'15	3'45
2'45	4'15
2'45	5'15
2'45	5'15
3'15	5'45
3'45	5'15
4'15	5'45

Прогнозные значения моментов времени прибытия автобуса на остановочный пункт «улица Сидаж», рассчитанные с использованием данных из первой колонки табл. 2 и матрицы переходов табл. 1 по формулам (2) и (3), представлены в табл. 3 и на рис.4.

Таблица 3

Результаты прогнозирования		
Прогнозные значения	Фактические значения	Абсолютная погрешность
3.625	3.75	0.125
5.068182	4.25	0.818
5.464286	5.25	0.214
5.75	5.25	0.500
5.75	5.75	0.000
0	5.25	5.250
6.125	5.75	0.375

### 3.2 Анализ результатов прогнозирования

Как видно из рис. 4, прогнозное время движения значительно отличается от фактического значения для шестого автобуса. Это свидетельствует о недостаточной точности построенной матрицы переходов (табл. 1). Анализ причин данной погрешности позволил установить, что для повышения точности прогнозов требуется больший объем данных о затратах времени на движение автобусов. В частности, именно недостаток накопленных данных о времени движения автобу-

сов между остановочными пунктами «Третья улица Хесинг» и «улица Хесинг» в 4'45 является причиной погрешности проведенного расчётного эксперимента.

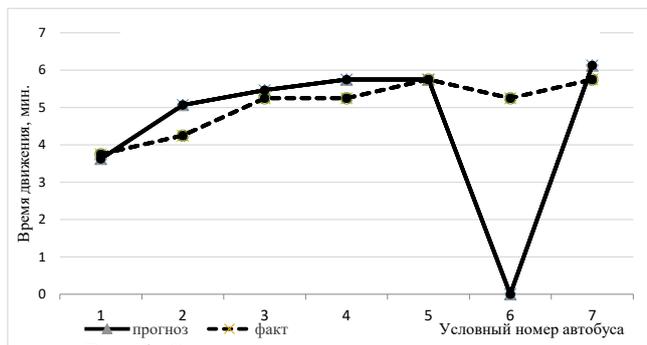


Рис. 4. Сравнение прогнозных значений с фактическими данными

Абсолютная погрешность между прогнозными и фактическими значениями для остальных случаев является незначительной. Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанный алгоритм прогнозирования моментов времени прибытия автобусов на остановочные пункты на основе Марковских цепей является адекватным и позволяет, при условии накопления достаточного объема статистических данных о фактических затратах времени на движение автобусов, получать достаточно точные результаты.

### Заключение

На основе исследования особенностей движения автобусов на городских маршрутах, авторами разработан алгоритм прогнозирования, основанный на использовании метода цепей Маркова и позволяющий прогнозировать время движения городских автобусов между остановочными пунктами и моменты времени их прибытия на остановки. Апробация разработанного алгоритма на примере автобусного маршрута №14

(г. Харбин, КНР) позволяет сделать вывод о его адекватности.

Сравнение результатов прогнозирования, полученных с использованием разработанного алгоритма, с фактическими данными показал недостаточную точность прогноза при небольших размерах статистических выборок времени движения автобусов.

Для повышения точности матрицы переходов и результатов прогнозирования необходимо накапливать и обрабатывать статистические данные о работе автобусов на маршруте в течение длительного времени.

### Список литературы

1. XIANG Hongyan, PENG Xuewen Current Study and Development Trend of Bus Arrival Time Prediction // Journal of Transport Information and Safety. 2014, no. 4, pp. 57–61. (In Chinese).
2. Sun D., Luo H., Fu L., Liu W., Liao X., Zhao M. Predicting Bus Arrival Time on the Basis of Global Positioning System Data // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2007, vol. 2034, no. 1, pp. 62–72. doi: 10.3141/2034-08.
3. Chien S. I.-J., Ding Y., Wei C. Dynamic Bus Arrival Time Prediction with Artificial Neural Networks // Journal of Transportation Engineering. 2002, vol. 128, no. 5, pp. 429–438. doi: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:5(429).
4. Lin Y., Yang X., Zou N., Jia L. Real-Time Bus Arrival Time Prediction: Case Study for Jinan, China // Journal of Transportation Engineering. 2013, vol. 139, no. 11, pp. 1133–1140. doi: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000589.
5. Shalaby A., Farhan A. Prediction Model of Bus Arrival and Departure Times Using AVL and APC Data // Journal of Public Transportation. 2004, vol. 7, no. 1, pp. 41–61. doi: 10.5038/2375-0901.7.1.3.
6. Vanajakshi L., Subramanian S. C., Sivanandan R. Travel time prediction under heterogeneous traffic conditions using global positioning system data from buses // IET Intelligent Transport Systems. 2009, vol. 3, no. 1, p. 1. doi: 10.1049/iet-its:20080013.
7. Bin Y., Zhongzhen Y., Baozhen Y. Bus Arrival Time Prediction Using Support Vector Machines // Journal of Intelligent Transportation Systems. 2006, vol. 10, no. 4, pp. 151–158. doi: 10.1080/15472450600981009.
8. Jihua Hu, Guoyuan Li, Zhifeng Cheng Algorithm for predicting bus travel time between stops based on Markov chain // Journal of Transport Information and Safety. 2014, vol. 32, no. 2, pp. 17–22. (In Chinese).

Материал поступил в редакцию 24.05.2018

Тьянь Ю., Рахмангулов А.Н., Муравьев Д.С., Ван С. Алгоритм прогнозирования моментов времени прибытия городских пассажирских автобусов на основе Марковских цепей // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2018. Т.8. №2. С. 29-38