

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД АВТОРЕГУЛИРОВАНИЯ СВЕТОФОРОВ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ДЛИНЫ ОЧЕРЕДЕЙ

Х. Мирзаи, Н. А. Тюкачев

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 27.09.2016 г.

Аннотация. В статье рассматриваются задача авторегулирования светофоров на основе прогноза длины очередей. Разработана формула для прогноза длины очередей в каждом цикле светофора, на основе которой время цикла светофоров разделяется между фазами. Предлагаемая модель светофора оснащена универсальностью и гибкостью для применения в реальных ситуациях. Кроме того, данный подход позволяет динамически определить оптимальное время цикла светофора в зависимости от длины очередей. Результаты тестов показывают значительное преимущество и эффективность адаптивной модели по сравнению с классической фиксированной моделью.

Ключевые слова: моделирование транспортных потоков, адаптивная модель, авторегулирование светофоров, дороги, полоса, теория массового обслуживания, прогноз длины очередей.

Annotation. The article is devoted to the problem of auto-controlling the traffic lights, based on the forecast of the queue lengths. A new formula has been developed to forecast the queue length in each traffic light cycle, based on which the cycle time is shared between traffic light phases. The suggested model is equipped with flexibility and universality in order to apply it in real life situations. Besides, the method allows us to define the optimal cycle time, dynamically, according to traffic load. The test results show priority and efficiency of the proposed model comparing with the classical fixed model.

Keywords: simulation of transport flow, adaptive model, auto-controlling the traffic light, road, lane, Queuing theory, forecasting queue lengths.

ВВЕДЕНИЕ

Задача моделирования транспортных потоков с каждым днём растёт с увеличением количества автомобилей и, соответственно, заторов и пробок. Актуальность задачи моделирования транспортных потоков связана с обновлением старых методов регулирования движения транспорта с использованием новых технологий и с появлением новых общедоступных технологий таких, как GPS, смартфоны и разные виды датчиков и аппаратов для обмена сигналами.

Настоящая работа посвящена задаче авторегулирования светофоров. Предполагается, что у дорог установлены датчики, которые измеряют количество проезжающих автомобильных транспортных средств (АТС) че-

рез некоторую точку. Здесь не обсуждается организация системы датчиков, но предположим, что такая система организована, и в любое время доступны три параметра: интенсивность входящего и выходящего потока и количество накопившихся АТС (текущая длина очередей).

С точки зрения классификации задач моделирования транспортных потоков, предлагаемая модель принадлежит микроскопическому моделированию. Микроскопическое моделирование изучает отдельные элементы транспортных систем в масштабах секунды или доли секунды. Для данной модели характерны такие факторы, как случайная генерация транспортных средств, случайный выбор маршрута и определение поведения.

В первом разделе данной работы *Модель перекрёстка и светофоров* подробно описывается модель перекрёстка и светофоров,

а затем в разделе *Оптимизационная задача* объясняется, в чем заключается оптимизация предлагаемого метода в данной статье. Далее, в разделе *Динамическая группировка* описывается алгоритм динамической группировки полос. Затем, в разделе *Результаты тестирования* подведены итоги проведенного тестирования. Выводы приведены в *Заключении*.

МОДЕЛЬ ПЕРЕКРЁСТКА И СВЕТОФОРОВ

Определим некоторые сущности и термины, которые нам понадобятся в дальнейшем.

- АТС – Автомобильное транспортное средство.
- Дорога – обустроенная или приспособленная и используемая для движения АТС. Дорога включает в себя одну или несколько полос движения.
- Полоса движения – любая из продольных полос проезжей части, обозначенная или не обозначенная разметкой и имеющая ширину, достаточную для движения автомобилей в один ряд.
- Светофор – оптическое устройство, подающее световые сигналы, регулирующие движение автомобильного, железнодорожного,

водного и другого транспорта, а также пешеходов на пешеходных переходах.

- Совместимость полос – множество полос считается совместимым, совместное движение которых на перекрестке не пересекается или не препятствует друг другу.
- Карта совместимости – содержит соответствие не пересекающихся движений, т. е. содержит информацию о совместимости полос.

Согласно нормам [1] цикл работы светофоров настраивается таким образом, чтобы исключить пересечение транспортных и пешеходных потоков в одной фазе. Это значит, что, если для одного направления включен разрешающий сигнал, то для пересекающего направления будет включен запрещающий сигнал.

На практике светофор, кроме основных сигналов (зеленый, красный), имеет еще и промежуточный (желтый) сигнал. На самом деле, промежуточный сигнал (желтый) является частью основных сигналов, который появляется в конце каждой фазы основного сигнала светофора. Для простоты модели в дальнейшем предполагаем, что светофор будет иметь только два основных сигнала.

Пусть всего имеется N полос движения, присоединяющихся к перекрестку (см. рис. 1).

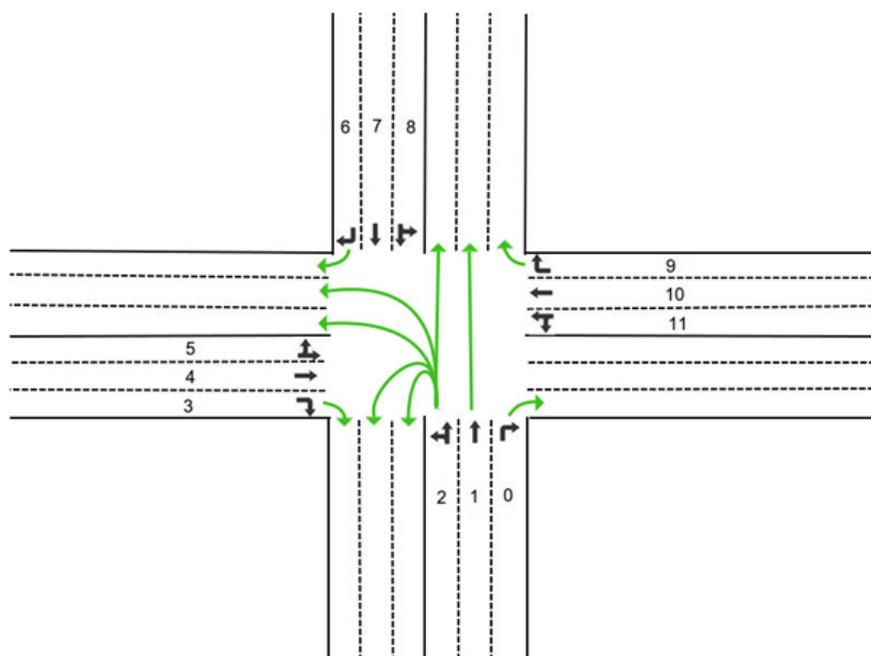


Рис. 1. Перекресток со схемой движения на каждой полосе. Возможные направления движения полос указаны черными знаками. Зеленые стрелки показывают одну фазу светофора, в которой разрешено движение для групп совместимых полос

Каждая полоса может рассматриваться как независимая система массового обслуживания, типа M/M/1/m FIFO. Здесь используется компонентное символическое обозначение системы массового обслуживания (СМО), предложенное Кендаллом (Candall) и развитое в работах Г. П. Барашина [2].

λ_i – интенсивность потока АТС i -ой полосы.

$\overline{\lambda_i}$ – интенсивность обслуживания i -ой полосы.

q_i – текущая длина очереди i -ой полосы.

T – длина интервала одного цикла.

$T = \sum_{i=1}^N \tau_i$ – интервал времени разрешающего (зеленого) сигнала i -ой полосы.

ρ_i – интенсивность загрузки полосы, т. е. в среднем за время выхода одного АТС с перекрестки накапливается в среднем ρ_i количество АТС за перекрестком на i -ой полосе.

$$Q_i(\overline{\lambda}, \mu_i, q_i) = q_i + \lambda_i(T - \tau_i) + \tau_i \rho_i - w_i, i = \overline{1, N} \quad (1)$$

$$w_i = \begin{cases} q_i + \tau_i \rho_i, & \mu_i \tau_i \geq q_i + \tau_i \rho_i \\ \mu_i \tau_i, & \text{else} \end{cases}$$

где Q_i – прогноз длины (загрузка) очереди в конце текущего или в начале следующего интервала.

Формула (1) является основой для расчета и управления светофорных сигналов. Эту формулу можно интерпретировать следующим образом:

По прогнозу на основе входных параметров, λ_i , μ_i , имея q_i АТС на i -ой полосе, за время запрещающего (красного) сигнала $(T - \tau_i)$ подъезжает $(T - \tau_i)\lambda_i$ АТС, выезжает $\tau_i = \alpha_i T$ с данной полосы, и подъезжает $\tau_i \rho_i$ АТС во время разрешающего (зеленого) сигнала. Понятно, что длина очередей не может быть отрицательной, поэтому функция w^i условная. Если количество выезжающих АТС больше текущей длины очереди, и количество подъезжающих АТС во время зеленого сигнала удовлетворяет условию $(\mu_i \tau_i \geq q_i + \tau_i \rho_i)$, то из очереди вычитается текущая длина и, плюс к этому, количество АТС, которое добавляется во время зеленого сигнала $(q^i + \tau^i \rho^i)$, иначе вычитается столько, сколько выезжает за это время $(\mu^i \tau^i)$.

ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ЗАДАЧА

В работах [3, 4, 5] использовали теорию массового обслуживания для минимизации длины очередей, где длина очередей считалась бесконечной, но в реальной ситуации длина дорог всегда ограничена, поскольку на каждой дороге или полосе не может быть бесконечного количества АТС. Например, на трехполосной дороге длиной 1 км количество АТС не может быть больше M :

$$M = \frac{1000}{7} \times 3 \approx 142 \times 3 = 426,$$

где выделено 7 метров для каждого АТС.

Здесь плотность потока постоянна, но в разное время суток может меняться, что в данном случае влияет на значение M .

В данной работе количество отказов (количество АТС, которые не могут попасть на полосу из-за отсутствия места на полосе) является одним из показателей эффективности системы управления светофорами. Основная цель оптимизации является оптимальное распределение времени цикла светофора по фазам светофора. Выбор такого подхода для оптимизации обосновывается тем, что пропускная способность перекрестка в среднем является постоянной величиной. В этом случае задача оптимизации заключается в оптимальном (максимальном) использовании пропускной способности перекрестка. Данное рассуждение проще понять, если посмотреть на него с другого ракурса, когда не оптимально используется пропускная способность перекрестка, например, отсутствие АТС на перекрестке при разрешающем сигнале светофора.

Таким образом, в качестве задачи оптимизации ищется оптимальное распределение времени светофора так, чтобы время цикла светофора распределилось соответственно текущей загрузке очередей. Для вычисления загрузки очередей будем использовать формулу (1). Эта формула дает прогноз о загрузке (длине очереди) полосы в конце каждого цикла светофора.

$$\alpha_i = \frac{Q_i}{\sum_{l=1}^N Q_l}, \quad \sum_{i=1}^N \alpha_i = 1, \quad \tau_i = \alpha_i T,$$

$$T = \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где, τ_i – время зеленого сигнала i -ой полосы. Уравнения (2) описывает формулу распределения времени цикла светофора.

ГРУППИРОВКА СВЕТОФОРОВ

В данном разделе обсуждается метод динамической группировки полос. Под группой полос понимается множество полос, которые считаются совместимыми по заданному определению в данной статье.

Каждое направление дороги состоит только из одной полосы или из несколько полос. Таким образом, один светофор управляет движением одной или нескольких полос. В предлагаемой модели каждая отдельная полоса является отдельной независимой системой или СМО. Такой подход позволяет данной модели иметь гибкость и универсальность при применении модели для любых конфигураций дорог и перекрестков (например, светофор с дополнительными секциями). Предположим, что у каждой полосы есть светофор из двух сигналов – разрешающего и запрещающего сигнала.

$$C_i = \{\overline{L} \subset [1, N], L_k \xrightarrow{\text{не пересекает}} L_i\}, \\ i = \overline{1, N}, k \neq i$$

где L_i – индекс i -ой полосы и C – карта совместимости, двухмерный массив, C_i одномерный массив из индексов полос, которые не пересекаются с i -ой полосой. Определим двухмерный массив G :

$$G_k = \{\overline{g} \subset [1, N], |\overline{g}| = M_k\}, G_k \subset G, k = \overline{1, N_G}$$

где \overline{g} – подмножество из индексов совместимых полос в группе, M_k – количество членов k -ой группы. Количество групп, т. е. число N_G , может быть фиксированным, в случае статичной группировки полос, или может быть динамическим, которое определяется в начале каждого цикла светофора. Таким образом, время цикла светофора разделяется между N_G группами. Если обозначим загрузку i -ой полосы через Q_i , то общая загрузка группы для всех членов определяется следующим образом:

$$Q(G_k) = \sup\{Q_i | i \in G_k\}. \quad (3)$$

Уравнение (3) основывается на том, что, если загрузку группы считать как единое целое, то фактическая загрузка будет равна загрузке члена данной группы с максимальным значением. Следовательно, длительность зеленого сигнала для всех членов группы равна длине зеленого сигнала с максимальной загрузкой.

Группы состоят из полос разных загрузок. Тогда минимизация отклонения загрузки членов группы от наибольшего значения означает оптимальное использование времени цикла светофора.

$$D_k = \sum_{i=1}^{M_k} (Q_i - Q_{\max})^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

Q_{\max} – наибольшая загрузка k -ой группы.

D_k – выборочная дисперсия k -ой группы.

Задача (4) означает, что необходимо группировать полосы так, чтобы выборочная дисперсия загрузки членов группы была минимальной.

В данном случае оптимальность означает максимальное использование пропускной способности (зеленого сигнала) перекрестка. Другими словами, получаем возможность избежать ситуации, когда у светофора с разрешающим сигналом очередь АТС пустая. Для этой цели предложен алгоритм динамической группировки полос. Далее будем описывать алгоритм динамической группировки.

Пусть определена карта совместимости полос C .

Q_i – загрузка i -полосы (или прогноз длины очереди в конце цикла светофора)

$$k = 0; Lead_k = \sup\{Q_i \in G_k\};$$

$$\overline{R} = \{Q_i\}, \quad i = \overline{1, N}$$

Пока \overline{R} не пуст

Начало

1. $k++$;
2. $Lead_k = \sup\{Q_i \in \overline{R}\}$;
3. удалить $Lead_k$ из \overline{R} ;
4. $\overline{M} = \{Q_i \in \overline{R} | Q_i \xrightarrow{\text{не пересекает}} \overline{R}, \overline{M}\}$;
5. удалить \overline{M} из \overline{R}
6. $G_k = \{Lead_k, \overline{M}\}$;

Конец.

Описание алгоритма:

1. Увеличить индекс для новой группы.
2. Выбирать наибольшую загрузку за лидером группы.
3. Удалить найденный лидер $Lead_k$ из списка оставшихся элементов R
4. Найти все не пересекающиеся элементы с лидером и с уже найденными элементами. Обратит внимание на рекурсивное определение.
5. Удалить \bar{M} из списка оставшихся элементов R .
6. Новой группе G_k присваивается текущий лидер и совместные индексы.

Данный алгоритм применяется в начале (или в конце) каждого цикла светофора. Особенность этого алгоритма заключается в том, что он дает возможность максимально использовать пропускную способность перекрестка в текущей фазе, пропуская одновременно все АТС по всем возможным не пересекающимся полосам.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Далее приведем результаты сравнения двух моделей светофоров: модель с фиксированной длиной фазы и адаптивная модель. В данном тесте выделено 12 полос с фиксированной интенсивностью входящего и выходящего потока λ_i, μ_i соответственно. В ходе работы программы есть возможность изменить значения λ_i, μ_i . Генерация потоков происходит по Пуассоновскому закону. Для обоих методов длина интервала времени цикла светофора фиксирована и равна 120 секунд. Интервал моделирования потоков и работы светофора равен примерно 2.5 часа. Для фиксированной модели количество групп постоянно, а для адаптивной модели количество групп определяется динамически в начале каждого цикла светофора. На рис. 3 и 4 приведены результаты сравнения адаптивной и фиксированной модели. Критерия для сравнения:

Mean out per cycle – среднее число выходящих АТС в одном цикле светофора, т. е. $\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N out_i$, где out_i – число выходящих АТС

i -ой полосы с перекрестки и T – длина интервала одного цикла.

Total refusal – сумма отказов всех полос, т. е. число сгенерированных АТС, которые не могут подъехать на соответствующую полосу из-за отсутствия места.

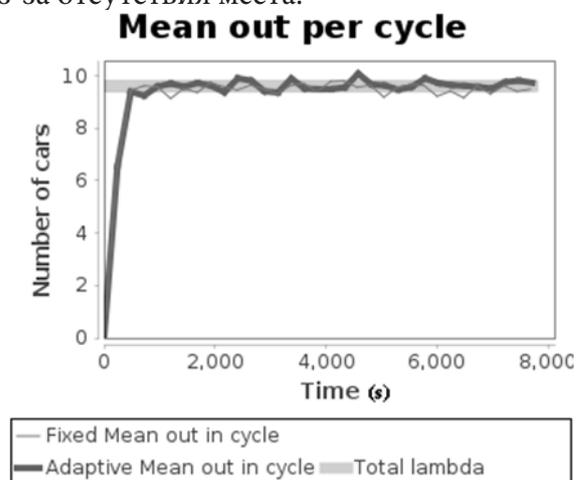


Рис. 3. График среднего числа выходящих АТС в одном цикле светофора

Линия *Total lambda* соответствует числу сгенерированных АТС в каждую секунду, т. е. $\sum_{i=1}^N \lambda_i$, где λ_i – интенсивность входящего потока. Видно, что число выходящих АТС адаптивной модели не меньше фиксированного в среднем.

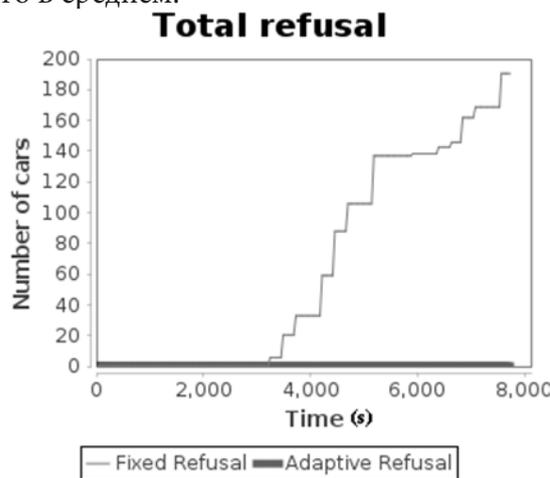


Рис. 4. График, изображающий общее количество отказов

Количество отказов является очень важным критерием при сравнении двух моделей, поскольку оно прямо отражает эффективность распределения времени между светофорами. Как видно на рис. 4, адаптивная

модель показывает свою эффективность по сравнению с фиксированной моделью. В ходе эксперимента адаптивная модель показала свое преимущество перед фиксированной моделью, особенно при динамическом изменении входящих параметров интенсивности входящих/выходящих потоков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривалась проблема авторегулирования светофора и предложен новый подход к задаче регулированию светофора с помощью прогноза загрузки очередей. Предложена формула для прогноза загрузки очередей на основе которой алгоритм динамической группировки определяет группу совместимых полос (очередей).

В отличие от предыдущих работ [3, 4, 5], где предложены громоздкие и не до конца решенные формулы, математические формулы, предложенные в данной статье, простые и результаты тестов показали явное преимущество адаптивной модели над фиксированной моделью.

Для проведения экспериментов и сравнения с традиционной фиксированной моделью, разработано программное обеспечение с графическим интерфейсом для ввода входные параметры системы и для вывода результатов.

Изучение поведения системы в условиях высокой загрузки показало, что в такой ситуации оптимально иметь постоянные интервалы между переключениями фазами светофора. Из преимуществ адаптивной модели в данной работе можно упомянуть:

- Простота формул и легкое вычисление в реальном времени.
- Универсальность и гибкость при применении для любых конфигураций светофоров и перекрестков.
- Адаптивность к изменению потоков.

- Возможность динамического изменения интервала цикла светофоров.

В дальнейшем планируются провести более детальных экспериментов и применять данную модель в программное обеспечение SUMO (Simulation of Urban MObility).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасное управление автомобилем. – 2016. – URL: <http://avtonauka.ru/pdd/6-signalysvetofora-i-regulirovshhika> (дата обращения: 14.03.2016)
2. Кошуняева Н. В. Теория массового обслуживания (практикум по решению задач): Учебно-методическое пособие / Н. В. Кошуняева, Н. Н. Патронова. САФУ имени М. В. Ломоносова. – Архангельск; САФУ, 2013. – 107 с.
3. Бабичева Т. С. Численные методы моделирования транспортных потоков при исследовании и оптимизации движения на управляемых перекрестках. – 2015. – Московский физико-технический институт (государственный университет). – URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/905/132-144.pdf> (дата обращения: 25.03.2016)
4. Бабичева Т. С. Методы теории массового обслуживания при исследовании и оптимизации движения на управляемых перекрестках. – Московский физико-технический институт (государственный университет). – URL: <https://mipt.ru/upload/medialibrary/9ac/119-130.pdf> (дата обращения: 25.03.2016)
5. Афанасьева Л. Г. Математические модели транспортных систем, основанные на теории очередей / Л. Г. Афанасьева, Е. В. Булинская. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. – URL: https://mipt.ru/upload/1b9/Pages_6-21_from_Trud-8-2-arphcx1tgs.pdf (дата обращения: 05.04.2016)

Мирзаи Хассан – аспирант, кафедра программирования и информационных технологий, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.
E-mail: hasanmirzae@yahoo.com

Mirzaee Hassan – PHD student, Department of Programming and Information Technologies, Faculty of Computer Science, Voronezh State University.
E-mail: hasanmirzae@yahoo.com

Тюкачев Николай Аркадиевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой программирования и информационных технологий, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет.
E-mail: nik@cs.vsu.ru

Tyukachev Nikolay A. – Candidate of Phys.-MD, Head of the department of Programming and Information Technology, faculty of Computer Science, Voronezh State University.
E-mail: nik@cs.vsu.ru