

КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПЕРЕКРЁСТКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБУЧАЕМОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ

Матросов С.В.

Ключевые слова: транспортная сеть, макроскопическая транспортная модель, предиктивное управление, обучаемая модель транспортных потоков.

Аннотация. В данной работе рассматривается применение методов предиктивного управления к компактным участкам городской транспортной сети, оснащённой детекторами и управляемыми перекрёстками. Компактность рассматриваемой сети позволяет использовать сложные модели транспортных потоков. Важной особенностью предложенного подхода является использование моделей транспортного потока, допускающих их обучение на предварительно собранных исторических данных.

THE CONCEPT OF PREDICTIVE TRAFFIC SIGNAL CONTROL WITH TRAINABLE MODEL OF TRANSPORT NETWORK

Matrosov S.V.

Keywords: traffic network, macroscopic traffic model, model predictive control, trainable traffic flow model.

Abstract. This paper considers the application of model predictive control methods to compact sections of the urban transportation network equipped with detectors and traffic lights. The compactness of the network under consideration allows the use of complex models of traffic flows. An important feature of the proposed approach is the use of traffic flow models that can be trained on pre-collected historical data.

Число машин в городе постоянно растёт, при этом расширение существующей транспортной сети затратно и не всегда возможно. Эффективное управление транспортными потоками позволяет лучше использовать уже существующую инфраструктуру.

В настоящей работе предложен подход, основанный на идее использования предиктивного управления системой светофоров с использованием обучаемой модели транспортной сети. Ограничимся рассмотрением компактных (1-3 км в диаметре) участков городской дорожной сети, оснащённых датчиками и светофорами.

Основные понятия и постановка задачи. В задачах транспортного регулирования принято выделять два направления – управление транспортными потоками в городе и регулирование трафика на автострадах. Такое разделение обусловлено спецификой задач и применяемыми средствами управления. Для города характерны меньшие скорости и большая плотность машин, регулирование осуществляется преимущественно посредством светофоров на перекрёстках. На автострадах применяются скоростные ограничения, а светофоры используются на въездах. В рамках настоящей работы нас будут интересовать подходы к регулированию трафика в городе.

Введём основные понятия, опуская технические детали, не являющиеся существенными для постановки задачи.

- *Светофорный контроллер* - специальное устройство, управляющее системой светофоров на перекрёстке.

- *Светофорный сигнал* определяет разрешённые направления движения автотранспорта.

- *Фаза светофорного регулирования* - фиксированная комбинация светофорных сигналов для всех светофоров на перекрёстке

- *Программа светофорного регулирования* задаёт последовательность фаз светофорного регулирования, а также их длительность.

- *План светофорного регулирования* задаёт расписание, в соответствии с которым программа может переключать фазы.

- *Режим светофорного регулирования* определяет способ управления светофорным контроллером и тип используемых программ.

Целью работы является построение алгоритма управления системой светофорных контроллеров, обеспечивающего максимальную пропускную способность управляемой транспортной сети.

Существующие решения. Стратегии управления системой светофорных контроллеров можно классифицировать по типу режима регулирования и наличию координации между перекрёстками.

Наиболее распространенным режимом регулирования является так называемое *управление с фиксированным планом* – программа светофорного контроллера задаётся заранее подготовленным планом. Другим режимом регулирования является так называемое *адаптивное управление светофорными объектами*, в рамках которого последовательность и длительность фаз выбирается на основе данных о дорожно-транспортной ситуации.

Наличие координации между перекрёстками означает, что при выборе фаз светофорного регулирования учитывается влияние соседних перекрёстков друг на друга.

Рассмотрим основные группы стратегий, перечислим их эталонные реализации, а также достоинства и недостатки применяемых подходов:

- *Изолированный перекрёсток с фиксированными планами* – для каждого перекрёстка заранее подбирается план светофорного регулирования. Главное преимущество – простота. Недостатки – неспособность подстраиваться под транспортную ситуацию, а также нет гарантии, что транспортные потоки разных перекрёстков не будут конфликтовать. Примером реализации такого подхода является система SIGSET [1]

- *Скоординированные перекрёстки с фиксированными планами* – координация между перекрёстками осуществляется посредством подбора сдвигов по времени между планами различных контроллеров. Планы могут быть как составлены заранее, так и подобраны системой при построении координации. Типичные представители MAXBAND [2] и TRANSYT [3, 4].

Преимущества – простота и надёжность. Недостатки – неспособность адаптироваться к изменениям в дорожно-транспортной сети.

– *Изолированный перекрёсток с адаптивным планом* – управление осуществляется по показаниям детекторов и видеокамер, установленных на подъездах к перекрёстку. Большинство алгоритмов основаны на наборе правил, определяющих следует ли удерживать текущую фазу контроллера или переключиться на другую. Типичный представитель INSYNC [5]. Подход показал себя эффективным – в некоторых случаях получается добиться увеличения пропускной способности транспортной сети до 40% в сравнении с фиксированными планами. Недостатком данного подхода является чувствительность к расстоянию между перекрёстками и плотности транспортных потоков – чем ближе перекрёстки друг к другу и чем больше нагрузка на транспортную сеть, тем с большей вероятностью потоки будут мешать друг другу.

– *Скоординированные перекрёстки с адаптивными планами* – самое многообещающее и разнообразное семейство стратегий. Наиболее известными представителями являются системы SCOOT [6] и SCATS [7], динамически выбирающие планы светофорного регулирования из заранее подготовленного набора, и система RHODES [8, 9], использующая прогнозы модели транспортной сети для построения планов регулирования. Достоинства подхода – возможность наиболее полно учитывать особенности поведения транспортной сети. Недостатки – необходимость искать компромисс между сложностью модели транспортной сети и длительностью расчётов.

Предиктивное управление системой перекрёстков. Рассматривается случай *централизованного управления*, в рамках которого контроль за всеми светофорными объектами осуществляется в одном центре принятия решений. Предлагается подход, основанный на использовании прогнозов модели транспортной сети для управления системой перекрёстков.

Управление будем осуществлять в дискретные моменты времени $t_n = n\Delta T$ посредством генерации планов $u_i \in U$ для светофорных контроллеров на промежуток времени $[t_i, t_i + \Delta T]$. Временной шаг ΔT выбирается в пределах 3-5 минут, что соответствует типичной длительности одного или двух циклов в стратегиях с фиксированными планами.

Предполагается, что в момент времени t_i нам известно текущее состояние системы $s_i \in S$ и входные потоки $d_i \in D$. На основе этих данных, выбранного управления $u_i \in U$ и модели транспортной сети F можно предсказать дальнейшее состояние системы s_{i+1} .

Для оценки пропускной способности транспортной сети можно использовать множество различных критериев, например, среднюю скорость потока, среднюю интенсивность, среднее время в пути, число машин, покидающих управляемую область, и т.д. В рамках используемого подхода принципиально важно, чтобы рассматриваемую метрику J_F можно было

рассчитать при помощи модели транспортной сети F . Тогда выбор оптимального управления можно представить как задачу оптимизации:

$$\arg \min_{u_i \in U} J_F(s_i, d_i, u_i).$$

В таком случае цикл управления можно представить как следующую последовательность шагов: оценка текущего состояния транспортной сети $s_i = F(s_{i-1}, u_{i-1}, d_{i-1})$, измерение входных транспортных потоков d_i и выбор оптимального управления u_i .

Модель транспортной сети и пространство состояний системы. Перед вводом системы в эксплуатацию обычно собираются данные о характеристиках трафика на управляемом участке. Как правило, это данные о скоростях и интенсивностях транспортных потоков, собранные детекторами. Способность модели учитывать исторические данные является существенным преимуществом.

Макроскопические модели транспортных потоков достаточно точно передают динамику транспортной сети и позволяют эффективно оценивать наиболее распространённые метрики пропускной способности. Также они предлагают простой механизм для учёта собранных исторических данных.

В рамках макроскопического подхода транспортный поток описывается при помощи таких усреднённых параметров как плотность $\rho(x, t)$, скорость $v(x, t)$ и интенсивность $Q(x, t)$. Их динамика задаётся при помощи дифференциальных уравнений в частных производных.

Для макроскопических моделей ключевую роль играет понятие фундаментальной диаграммы, введённое Б.Гриншилдом [10, 11]. Она задаёт зависимость интенсивности транспортного потока от его плотности.

Имея достаточный объем исторических данных, можно построить фундаментальную диаграмму, учитывающую локальные особенности управляемой области дорожно-транспортной сети.

Существует множество различных макроскопических моделей транспортных потоков. В настоящей работе будем использовать обобщённую ARZ-модель (GARZ) [12]. Она является естественным развитием идей ARZ-модели [13, 14], показывает хорошую точность в разнообразных условиях и позволяет тонко настраивать фундаментальную диаграмму на основе исторических данных (см. рис. 1).

Транспортную сеть будем задавать как направленный граф, где рёбрам соответствуют дороги, а вершинам – перекрёстки. Каждой вершине в соответствие ставится как минимум одна «матрица координации», задающая распределение машин по поворотам перекрёстка. Управляемые перекрёстки имеют несколько таких матриц, соответствующих разным фазам светофорного регулирования, а неуправляемые – одну.

Каждому ребру e дорожного графа в соответствие ставится функция $s_e(x, t)$, задающая значение макроскопических параметров в любой точке x выбранной дороги в произвольный момент времени t . Динамика макроскопических параметров вычисляется в соответствии с моделью GARZ.

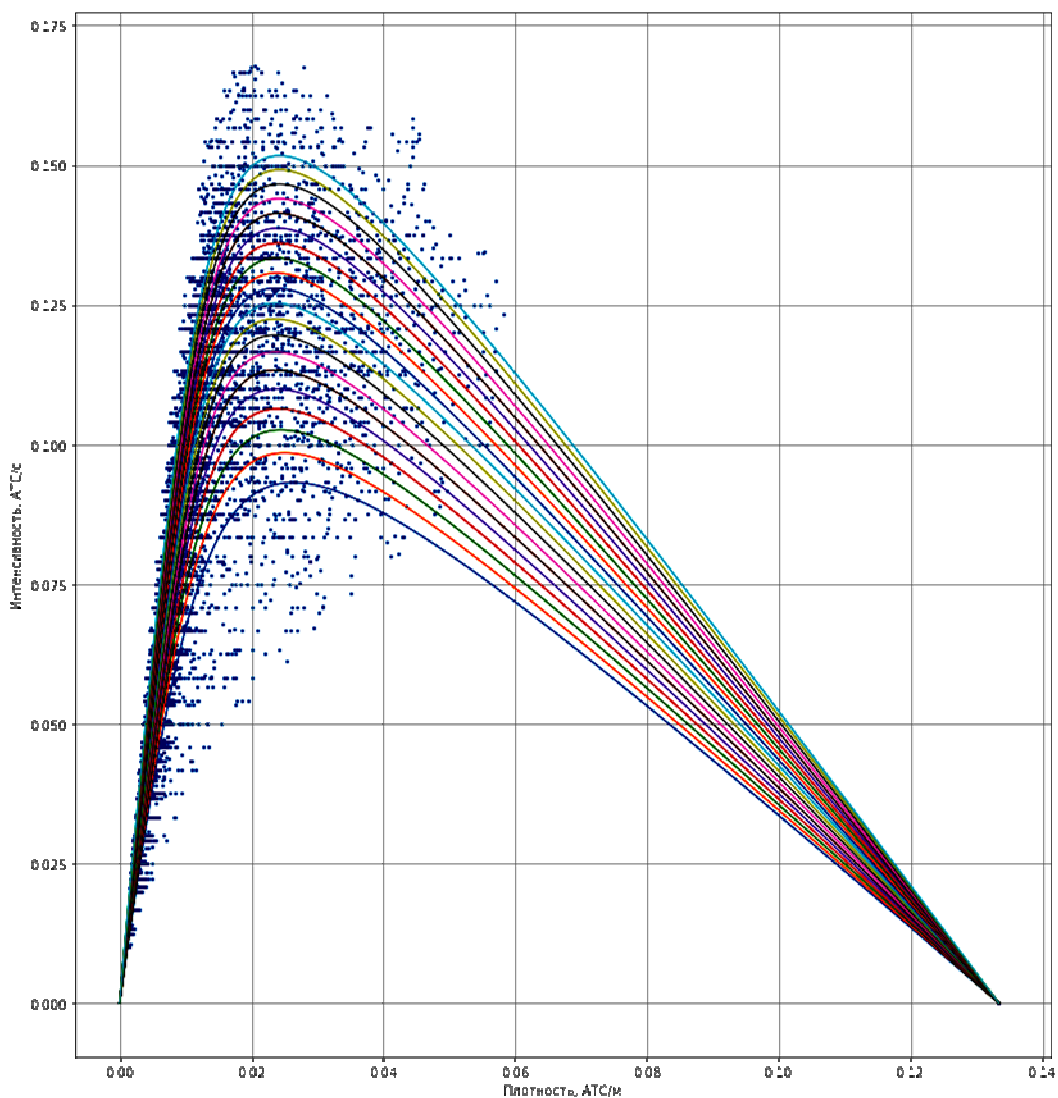


Рис. 1. Фундаментальная диаграмма для модели GARZ, построенная на основе исторических данных

Для описания динамики транспортных потоков в вершинах транспортного графа будем использовать подход, предложенный в статье [15]. Предполагается, что водители стремятся как можно быстрее проехать через перекрёсток, из чего следует, что суммарный поток внутри вершины графа должен быть максимальным. Математически это формулируется как задача оптимизации.

Состояние системы s_i задаётся совокупностью распределений макроскопических параметров на рёбрах и выбранными фазами в вершинах в момент времени t_i .

Эвристика локального поиска при решении задачи оптимизации. Поиск подходящего расписания для управляемого участка транспортной сети

сводится к задаче дискретной оптимизации. С ростом числа управляемых перекрёстков в сети сложность поиска оптимального решения растёт экспоненциально.

Однако, в момент времени t_i мы знаем расписание для предыдущего цикла u_{i-1} . При выборе достаточно небольшого ΔT (3-5 минут) ситуация в транспортной сети скорее всего изменится не слишком сильно. Тогда можно воспользоваться эвристикой локального поиска - мы будем искать в некоторой окрестности предыдущего расписания такое управление, которое будет давать большее значение целевой функции.

В настоящей работе предложена концепция управления дорожно-транспортной сетью методами предиктивного управления с применением обучаемой модели транспортной сети. Ключевой особенностью данной концепции является использование модели транспортных потоков, позволяющей автоматически строить аппроксимацию фундаментальной диаграммы на основе исторических данных. Интерес для дальнейшей работы представляет апробация предложенного подхода в компьютерном эксперименте, а также разработка алгоритма коррекции оценки состояния транспортной системы после получения данных с детекторов.

Список литературы / References

1. Richard E Allsop. Sigset: a computer program for calculating traffic signal settings. Traffic Engineering & Control, 1971.
2. John DC Little, Mark D Kelson, and Nathan H Gartner. Maxband: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks. 1981.
3. Dennis I Robertson. Transyt: a traffic network study tool. 1969.
4. Min-Tang Li and Albert C Gan. Signal timing optimization for oversaturated networks using transyt-7f. Transportation Research Record, 1683(1):118–126, 1999.
5. Studer L. P., Ketabdari M., Marchionni G. Analysis of adaptive traffic control systems design of a decision support system for better choices. – 2015.
6. PB Hunt, DI Robertson, RD Bretherton, and M Cr Royle. The scoot on-line traffic signal optimization technique. Traffic Engineering & Control, 23(4), 1982.
7. PR Lowrie. Scats, Sydney coordinated adaptive traffic system: A traffic responsive method of controlling urban traffic. 1990.
8. Pitu Mirchandani and Larry Head. A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 9(6):415–432, 2001.
9. Pitu Mirchandani and Fei-Yue Wang. Rhodes to intelligent transportation systems. IEEE Intelligent Systems, 20(1):10–15, 2005.
10. Bruce Douglas Greenshields, JT Thompson, HC Dickinson, and RS Swinton. The photographic method of studying traffic behavior. In Highway Research Board Proceedings, volume 13, 1934.

11. BD Greenshields, JR Bibbins, WS Channing, and HH Miller. A study of traffic capacity. In Highway research board proceedings, volume 1935. National Research Council (USA), Highway Research Board, 1935.
12. Shimao Fan, Michael Herty, and Benjamin Seibold. Comparative model accuracy of a data-fitted generalized aw-rascle-zhang model. arXiv preprint arXiv:1310.8219, 2013.
13. AATM Aw and Michel Rascle. Resurrection of "second order" models of traffic flow. SIAM journal on applied mathematics, 60(3):916–938, 2000.
14. H Michael Zhang. A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior. Transportation Research Part B: Methodological, 36(3):275–290, 2002.
15. Michael Herty and Michel Rascle. Coupling conditions for a class of second-order models for traffic flow. SIAM Journal on mathematical analysis, 38(2):595–616, 2006.

Матросов Сергей Владимирович – аспирант, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; matrosik14@gmail.com	Matrosov Sergey Vladimirovich – graduate student, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; matrosik14@gmail.com
--	--

Received 19.06.2021