

АЛГОРИТМ ПРЕДИКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПЕРЕКРЕСТКОВ НА ОСНОВЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

Матросов С.В.

Ключевые слова: транспортная сеть, макроскопическая транспортная модель, предиктивное управление, генетический алгоритм.

Аннотация. В работе предлагается алгоритм предиктивного управления светофором на участке городской транспортной сети, оснащенный детекторами и управляемыми перекрестками. В качестве прогнозирующей модели используется макроскопическая модель транспортного потока. Определение расписания светофорных контроллеров основано на генетическом алгоритме локального поиска. Проведена апробация алгоритма на нескольких синтетических транспортных сетях при помощи программного пакета SUMO.

ALGORITHM PROGNOSTIC CONTROL OF SYSTEM OF CROSSROADS BASED ON MACROSCOPIC MODELS OF TRAFFIC FLOWS

Matrosov S.V.

Keywords: traffic network, macroscopic traffic model, model predictive control, genetic algorithm.

Abstract. The paper proposes a predictive control algorithm for the problem of traffic light regulation on a section of the urban transport network equipped with detectors and controlled intersections. A macroscopic model of the traffic flow is used as a predictive model. The determination of the traffic light controller schedule is based on the genetic algorithm of local search. The control algorithm was tested on several synthetic transport networks using the SUMO software package

Светофорное регулирование является одним из наиболее эффективных способов управления транспортными потоками в городских условиях. Но на практике до сих пор чаще всего применяются подходы, основанные на использовании фиксированных планов для светофорных контроллеров. В настоящей работе предлагается алгоритм автоматического управления системой перекрестков, способный адаптироваться к изменениям в дорожной ситуации.

Предиктивное управление системой перекрестков. Концепция предиктивного управления системой перекрёстков с использованием обучаемой модели транспортной сети приведена в работе [1]. Управление перекрестком осуществляется в дискретные моменты времени $t_i = i\Delta T$ посредством генерации расписания $u_i \in U$ для светофорных контроллеров на промежутки времени $[t_i, t_i + \Delta T]$.

Предполагается, что в момент t_i известно текущее состояние транспортной сети $s_i \in S$ и входные потоки $d_i \in D$. На основе этих данных, выбранного управления u_i и модели системы F мы можем предсказывать ее дальнейшее состояние $s_{i+1} = F(s_i, d_i, u_i)$. Тогда выбор оптимального

расписания можно сформулировать как задачу оптимизации $\arg \max_{u_i \in U} J_F(s_i, d_i, u_i)$. Здесь функцию J_F , оценивающую управление на основе предсказаний модели системы F , будем задавать в виде суммарного числа машин, покинувших транспортную сеть за промежуток времени ΔT .

В последующих разделах будут более детально описаны пространство состояний S , модель транспортной сети F , пространство допустимых расписаний U и применяемый алгоритм оптимизации.

Пространство состояний транспортной сети. Транспортную сеть будем задавать как направленный граф, где ребрам соответствуют полосы дороги, а вершинам перекрестки. Каждой вершине в соответствие ставится «матрица координации», задающая распределение машин по поворотам перекрестка.

При описании транспортных потоков будем использовать макроскопический подход, в рамках которого состояние описывается распределением плотности $\rho(x, t)$, средней скорости $v(x, t)$ и интенсивности $Q(x, t)$ на полосе. Динамику этих распределений будем задавать при помощи уравнений в частных производных.

Матрица координации $\alpha_{ij}^{v,p} \in R^{M \times N}$ перекрестка v соответствующая фазе p задает долю машин, поворачивающих с въезда i на выезд j . Управляемые перекрестки имеют несколько фаз, а неуправляемые - одну.

Состояние системы s_t задается совокупностью распределений макроскопических параметров в ребрах и выбранными фазами в вершинах в момент времени t .

Модель транспортных потоков. В настоящей работе использована обобщенная ARZ-модель (GARZ) [2]. В качестве основных макроскопических переменных выбраны плотность транспортного потока ρ и параметр ω , характеризующий максимальную скорость водителя в потоке:

$$\begin{cases} \rho_t + (\rho v)_x = 0; \\ (\rho \omega)_t + (\rho \omega v)_x = 0; \\ v = V(\rho, \omega). \end{cases}$$

Зависимость $V(\rho, \omega)$ называется фундаментальной диаграммой и в случае с моделью GARZ строится на основе собранных исторических данных. В литературе часто фундаментальной диаграммой называют зависимость интенсивности потока от его плотности $Q(\rho, \omega)$. Справедливо следующее соотношение:

$$Q(\rho, \omega) = \rho V(\rho, \omega).$$

Для поиска приближенного решения используется метод Годунова – расчетная область разбивается на фиксированные объемы и каждой клетке в соответствие ставятся усредненные параметры потоков.

Разностная схема для указанной системы записывается так:

$$\begin{aligned}\rho_i^{n+1} &= \rho_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{i+1/2}^n - Q_{i-1/2}^n); \\ y_i^{n+1} &= y_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (\omega_{i-1}^n Q_{i+1/2}^n - \omega_i^n Q_{i-1/2}^n); \\ \omega_i^n &= y_i^n / \rho_i^n.\end{aligned}$$

Потоки между клетками $Q_{i\pm 1/2}^n$ находятся как решения задачи Римана. Для численных расчетов используется формализм функций отправки и получения, предложенный в работе [3].

Для пары клеток $U_L = (\rho_L, \omega_L)$ и $U_R = (\rho_R, \omega_R)$ функция отправки $S(U_L, U_R)$ задает максимальный поток, который может покинуть клетку U_L . Функция получения $R(U_L, U_R)$ задает максимальный поток, который может принять клетка U_R . Таким образом, поток между клетками задается выражением $Q = \min\{S, R\}$

Для корректного решения задачи Римана в случае модели GARZ необходимо вводить промежуточное состояние между клетками $U_M = (\rho_M, \omega_M)$. В случае $\omega_L < v_R = V(\rho_R, \omega_R)$ промежуточное состояние равно $U_M = (0, \omega_L)$. В противном случае оно вычисляется из уравнений:

$$\rho_M : u_R = V(\rho_M, \omega_L); \quad \omega_M = \omega_L.$$

Чтобы вычислить функции отправки и получения нам потребуются следующие величины:

$$\rho_c(\omega) = \arg \max_{\rho} Q(\rho, \omega); \quad Q^{\max}(\omega) = \max_{\rho} Q(\rho, \omega).$$

Тогда функции отправки и получения для модели GARZ задаются как:

$$S(\rho_L, \omega_L) = \begin{cases} \rho_L \omega_L, & \rho_L \leq \rho_c(\omega_L); \\ Q^{\max}(\omega_L), & \rho_L > \rho_c(\omega_L); \end{cases} \quad R(\rho_M, \omega_L) = \begin{cases} Q^{\max}(\omega_L), & \rho_M \leq \rho_c(\omega_L); \\ \rho_M \omega_L, & \rho_M > \rho_c(\omega_L). \end{cases}$$

Модель перекрестка. Ищем значения потоков на границе перекрестка как решение задачи оптимизации с ограничениями:

$$\begin{aligned}\max_{f_{ij}} & \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij} \right); \\ 0 & \leq f_{ij} \leq S_{ij}, \quad \forall i, j; \\ \sum_{i=1}^M f_{ij} & \leq R(\rho_{j-}, \omega_{j-}), \quad \forall j.\end{aligned}$$

В данном случае мы рассматриваем перекресток с M въездами и N выездами. f_{ij} - поток из i -го въезда в j -й выезд. $S_{ij} = \alpha_{ij} S_i$ - функция отправки из i в j , α_{ij} - процент машин, едущих по данному направлению, а S_i - функция отправки для последней клетки i -й дороги.

Как и в случае решения задачи Римана на одной полосе, для расчета функции получения R дороги j необходимо найти промежуточное состояние потока на въезде $U_{j-} = (\rho_{j-}, \omega_{j-})$. Оно задается уравнениями:

$$\begin{aligned}\omega_{j-} &= \left(\sum_{i=1}^M \omega_i f_{ij} \right) / \left(\sum_{i=1}^M f_{ij} \right); \\ v_{j-} &= \min \{ \omega_{j-}, v_j \}; \\ \rho_{j-} : v_{j-} &= V(\rho_{j-}, \omega_{j-}).\end{aligned}$$

Обозначим поток через выезд j как $F_j = \sum_{i=1}^M f_{ij}$. Учитывая некооперативное поведение водителей на перекрестке, будем предполагать, что доля каждого въезда в суммарном потоке пропорциональна отношению максимального потока через въезд к суммарному возможному максимальному потоку:

$$f_{ij} = \beta_{ij} F_j \quad \beta_{ij} = S_{ij} / \left(\sum_{i=1}^M S_{ij} \right).$$

Нетрудно видеть, что полученная задача оптимизации решается аналитически после подстановки выражения для f_{ij} в исходные выражения.

Структура расписаний светофорного контроллера. Теперь опишем множество допустимых управлений U . Расписанием управляемого перекрестка мы называем последовательность фаз светофорного регулирования и времена их переключений.

Для уменьшения пространства поиска будем считать расписания всех перекрестков циклическими, считая, что последовательность фаз периодически повторяется. Будем обозначать расписание перекрестка v как $\Phi^v = \{ (p_k^v, \tau_k^v) : k = 1, \dots, K \}$, где p_k^v – идентификатор фазы, а τ_k^v – ее длительность.

Переключение между расписаниями осуществляется не строго в момент времени t_i , а по следующему правилу – последний цикл предыдущего расписания проигрывается до конца, а после него запускается новое расписание. Это необходимо для обеспечения безопасности дорожного движения.

Будем считать, что для каждого управляемого перекрестка последовательность фаз фиксирована. Тогда управлением для перекрестка v будет последовательность $u^v = (\tau_k^v)_{1, \dots, K^m}$. На длительности фаз также накладывается ряд ограничений. Во-первых, светофорные контроллеры, как правило, работают с целочисленными длительностями фаз. Во-вторых, для каждой фазы заданы минимальные и максимальные длительности. В-третьих, в некоторых случаях управляемые перекрестки должны иметь фиксированную длительность цикла.

Генетический алгоритм поиска. Поиск подходящего расписания для управляемого участка транспортной сети сводится к следующей задаче дискретной оптимизации:

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

С ростом числа управляемых перекрестков в сети сложность поиска решения перебором растет экспоненциально. Однако, в момент времени t_i мы знаем расписание u_{i-1} предыдущей итерации управления. При выборе достаточно небольшого ΔT (3-5 минут) ситуация в транспортной сети скорее всего изменится не слишком сильно. Тогда можно воспользоваться эвристикой локального поиска - искать новое управление u_i в некоторой окрестности предыдущего расписания u_{i-1} .

Будем рассматривать в качестве особи из популяции расписание для всех управляемых перекрестков на графе $u = (u^1, \dots, u^V)$. На каждой итерации генетического алгоритма будем поддерживать размер популяции равный N . В качестве первого поколения будем брать предыдущее расписание u_{i-1} и еще $N - 1$ случайно сгенерированных расписания.

Далее размер популяции удваивается. Для каждой особи генерируется потомок одним из описанных ниже способов:

- С вероятностью p_{ls} потомок особи u будет случайно выбран из δ -окрестности, которая задается следующим выражением:

$$B_\delta(u) = \left\{ \tau_k^v \in [\tau_k^v - \delta, \tau_k^v + \delta] \cap [\tau_{k,\min}^v, \tau_{k,\max}^v] : \forall v \in V, k = 1, \dots, K^v \right\} \cap U.$$

- С вероятностью p_{cross} потомок особи u будет сформирован путем замены компоненты u^j на u_{other}^j из другого расписания u_{other} в текущей популяции

- С вероятностью p_{new} в качестве потомка особи u будет случайным образом сгенерировано новое расписание

Среди получившихся $2N$ особей выбирается N наиболее приспособленных (с наибольшим значением J_F), из которых формируется следующее поколение. Цикл повторяется до тех пор, пока не исчерпается время на подбор расписания.

Численный эксперимент. Для тестирования описанного алгоритма управления использовался программный пакет SUMO [4]. Идея заключается в том, чтобы подменить данные от настоящей дорожной сети на синтетические данные, генерируемые средствами SUMO.

При помощи утилиты netedit было построено несколько дорожных сетей. Утилита traci использовалась для сбора данных о показаниях дорожных детекторов (индуктивные петли), об усреднённых параметрах транспортных потоков по полосам (плотность, интенсивность, скорость, число машин на полосе), а также для управления дорожными контроллерами в SUMO-симуляции. Взаимодействие SUMO-симуляции с программным комплексом, реализующим описанный выше алгоритм, осуществлялось при помощи языка программирования python.

Для проверки корректности прогнозов модели транспортной сети использовалось 3 сценария: прямая дорога с 4 светофорами, прямая дорога с 2 регулируемыми Т-образными перекрестками и прямоугольная сеть 2x2 с регулируемыми перекрестками на пересечениях дорог (см. рис. 1). Матрицы координации делят потоки поровну между направлениями. Длина каждой полосы 200 метров.

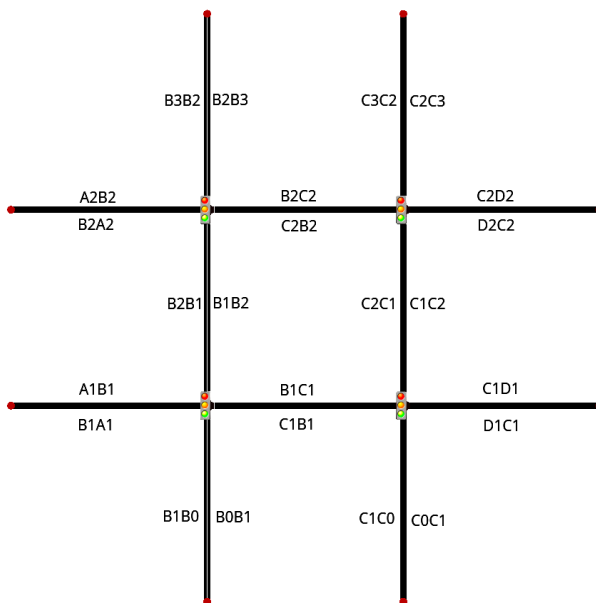


Рис. 1. Прямоугольная транспортная сеть 2x2

Сперва запускалась SUMO-симуляция и собирались данные о состоянии транспортных потоков. Потом проводилось аналогичное моделирование при помощи предложенной модели транспортной сети. Результаты моделирования сравнивались с данными, полученными в SUMO-симуляции. Ниже приведена таблица 1 с оценками погрешности разработанной модели.

Табл. 1. Погрешности разработанной модели

Сценарий	Интенсивность (АТС/с)	Скорость (м/с)	Плотность (АТС/м)
Прямая дорога	0.037 (6.2%)	2.362 (15.5%)	0.011 (8.2%)
2 Т-перекрестка	0.037 (6.2%)	2.823 (18.5%)	0.008 (5.2%)
Сеть 2x2	0.052 (8.6%)	3.085 (20.2%)	0.018 (13.7%)

На каждой полосе в дорожных графах были установлены по 3 дорожных детектора (в начале, середине и конце). Для каждого детектора вычислялась среднеквадратичная ошибка прогноза модели в точке, где стоит детектор. Оценка общей погрешности модели получается усреднением погрешности по всем полосам. В скобках указано процентное отношение погрешности к максимально возможному значению рассматриваемой величины, предусмотренному фундаментальной диаграммой.

Тестирование управления осуществлялось только на прямой дороге и сети 2x2. Шаг управления ΔT был выбран равным 2 минутам. Для всех фаз заданы одинаковые ограничения длительности – от 10 до 100 секунд.

В таблице 1 ниже приведено сравнение результатов предложенного алгоритма управления со статичным планом. В столбцах таблицы указано суммарное число машин, покинувших транспортную сеть за 1 час. Для алгоритма управления в скобках указано, на сколько процентов больше машин покинуло сеть в сравнении со статичным планом.

Табл. 2. Сравнение результатов предложенного алгоритма управления

Сценарий	Статичный план (АТС)	Предиктивное управление (АТС)
Прямая дорога	917	999 (8.94%)
Сеть 2x2	1909	2111 (10.58%)

Следует отметить, что в случае с прямой дорогой статичный план был выбран не оптимальным образом. Длительность красного сигнала второго светофора была сопоставима с длительностью зеленого сигнала и равнялась 45 секундам, а также сдвиги фаз светофоров друг относительно друга были не скоординированы. В ходе управления длительности красных сигналов светофоров уменьшились до минимально допустимых значений, а сдвиги скоординировались. Таким образом, алгоритм нашел оптимальное расписание, что показывает корректность работы алгоритма.

При тестировании сети 2x2 транспортные потоки были заданы следующим образом: первые 600 секунд симуляции все входные потоки равнялись 100 АТС/ч, затем потоки поочередно возрастали до 1200 АТС/ч в промежутке с 600 до 1200 секунд в направлении с запада на восток, с 1300 до 1900 секунд в направлении с севера на юг, с 2000 до 2600 секунд в направлении с востока на запад, с 2700 до 3600 секунд в направлении с юга на север.

На графиках, представленных на рисунке 2, приведены показания детектора, расположенного в конце полосы В3В2 (см. рис. 1).

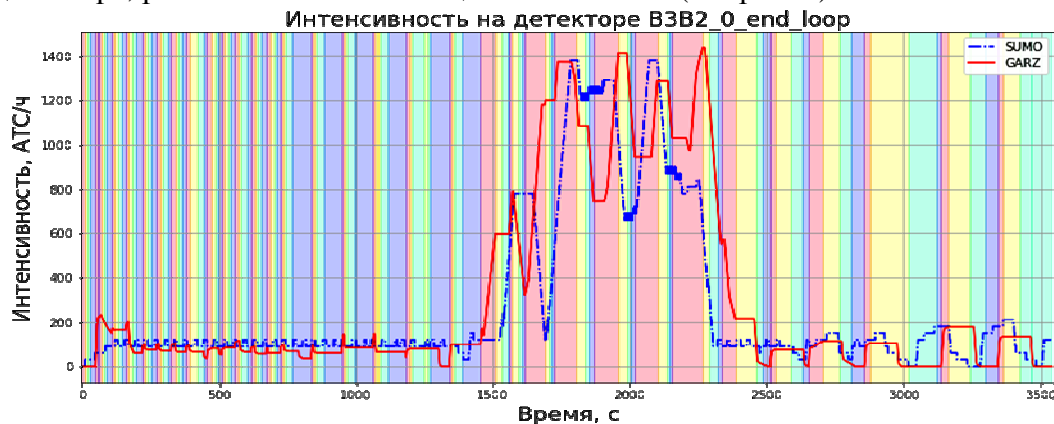


Рис. 2. Показания детектора, расположенного в конце полосы

На рисунке разным цветом выделено время работы разных фаз контроллера, управляющего выездом с полосы. Синим пунктиром показана интенсивность потоков, собранная с детекторов SUMO, красная линия – прогноз модели, цветные полосы – активная фаза контроллера на выезде с полосы. Видно, что алгоритм выставляет наибольшее время для фазы, пропускающей наибольший транспортный поток.

Список литературы / References

1. Матросов С.В. Концепция предиктивного управления системой перекрёстков с использованием обучаемой модели транспортной сети // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 25. С. 56-62.
 1. Matrosov S.V. The concept of predictive traffic signal control with trainable model of transport network // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. Iss. 25. P. 56-62.
2. Shimaо Fan, Michael Herty, and Benjamin Seibold. Comparative model accuracy of a data-fitted generalized aw-rasclе-zhang model. arXiv preprint arXiv:1310.8219, 2013
3. Jean-Patrick Lebacque, H Haj-Salem, and Salim Mammar. Second order traffic flow modeling: supply-demand analysis of the inhomogeneous riemann problem and of boundary conditions. Proceedings of the 10th Euro Working Group on Transportation (EWGT), 2005, 3(3).
4. Lopez P.A. et al., "Microscopic Traffic Simulation using SUMO," 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2018, pp. 2575-2582.

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

Received 21.12.2021