

УДК 629.7.05(045)

В. С. Грищенко

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ДОРОЖНІМ РУХОМ НА ПЕРЕХРЕСТІІнститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Розглянуто побудову системи автоматизованого керування дорожнім рухом на перехресті, яка працює за адаптивним методом. Розроблено алгоритм керування тривалістю фаз.

Ключові слова: автоматизована система керування дорожнім рухом, критерій оптимальності, тривалість фаз.

Вступ. Різке збільшення кількості транспортних засобів, об'ємів вантажних перевезень, а також стан на дорогах міста, що постійно змінюється, призводить до погіршення пропускної здатності доріг, зниження швидкості руху транспорту, появи заторових ситуацій і погіршення екологічного стану в місті.

Існує два шляхи поліпшення ситуації. Перший з них – це створення автоматизованих систем керування дорожнім рухом, другий – автоматизоване проектування топології транспортної мережі з урахуванням зростання інтенсивності руху на основі використання імітаційного моделювання.

Найбільш перспективний з погляду витрат – перший шлях, що передбачає застосування адаптивних методів керування дорожнім рухом із світлофорним регулюванням на перехресті.

У разі світлофорного регулювання на перехрестях використовують такі керувальні параметри:

- розподілення напрямків за фазами;
- послідовність фаз у циклі регулювання;
- тривалість циклу регулювання;
- структуру проміжних тактів;
- тривалість фаз;
- величину здвигу.

Децентралізована архітектура автоматизованих систем керування дорожнім рухом складається з одного контролера сигналу в кожному перетинанні мережі, який намагається мінімізувати сукупну затримку на всіх підходах до цього перетину. Для того, щоб виробляти ефективні способи вибору часу, оптимізатор сигналу в кожному перетині потребує інформації про поточні довжини черг і надходження на їх підходах. Передбачають, що щоразу, коли оптимізатор повторно обирає спосіб вибору сигналу, який задається періодом часу, виконується знімок системи і збирається інформація про всі надходження на підходи. Контролер розглядає підхід тільки до попереднього перетину. Тривалий рух на дорогах ігнорується.

Довжини черг і інформацію про надходження, необхідна оптимізатору, можна отримати декількома способами: за допомогою датчиків вхідних потоків, розміщених на всіх підходах до перетину; комбінацією датчиків вхідних і вихідних потоків; через камери спостереження. Контролер перетину має знати точний час, за який транспортний засіб досягає кінця дороги і черги, до якої він долучиться після досягнення перехрестя.

Автоматизована система керування дорожнім рухом визначає оптимальний сигнал, що перемикає послідовність фаз світлофора на перехресті, використовує стратегію, засновану на динамічному програмному принципі; це робиться щоразу, коли на контролер надходить знімок системи. Рішення, яке оптимізатор повинен прийняти в кожен проміжок часу, полягає у виборі необхідної зеленої фази. Кількість можливих вибирань у кожен момент часу дорівнює кількості фаз світлофора на перехресті.

Кожне рішення являє собою інтервал часу, коли фаза буде мати зелене світло. Цей інтервал називають кроком часу ($t_{кр}$). Якщо світло продовжує бути зеленим, тоді крок часу – дельта ($t_{кр} = \Delta$). Якщо світло тільки що змінилося на зелене, тоді це жовто-червоний час плюс мінімальний зелений час ($t_{кр} = t_{ж-ч} + t_{\min з}$). Протягом жовто-червоного періоду часу ніякі транспортні засоби не можуть потрапити на перехрестя, таким чином ця частина кроку часу не дозволяє рух на перехресті.

Дані інших досліджень також показують доцільність розроблення і введення систем динамічного керування транспортними потоками.

Постановка завдання. Топологія транспортної мережі, що задається у вигляді множини перехресть $\mathbf{int} = \{int_i\}$ і множини доріг $\mathbf{l} = \{l_i\}$, які входять і виходять із кожного перехрестя.

Кожна дорога являє собою сукупність смуг руху і положення транспортних засобів на ній розглядається на дискретних проміжках:

$$\Delta s = \bar{s}_v + \bar{s}_\Delta,$$

де $\bar{s}_\Delta$ – середня відстань між автомобілями; $\bar{s}_v$ – середня довжина автомобіля.

На кожному перехресті задано множину доступних фаз світлофорів (фаза стану світлофора F_d задається її порядковим номером як елемент множини $\mathbf{F} = \{F_d\}$ варіантів станів світлофорів, який визначає потоки транспортних засобів, що можуть проїхати через перехрестя). Час у системі дискретний, тривалість фази світлофора визначається кількістю послідовних фаз F_d з однаковим номером d .

Транспортному засобу системи присвоюється номер (індекс), за яким цей засіб ідентифікують. Індекс, положення і маршрут транспортного засобу описується матрицею $\mathbf{V}$, а номер дороги і наявність транспортних засобів на її ділянках – матрицею $\mathbf{L}$. Матриці $\mathbf{V}$ і $\mathbf{L}$ задаються таким чином:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_{1,0} & V_{1,1} & V_{1,2} & V_{1,3} & V_{1,4} & \dots & V_{1,n} \\ V_{2,0} & V_{2,1} & V_{2,2} & V_{2,3} & V_{2,4} & \dots & V_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{b,0} & V_{b,1} & V_{b,2} & V_{b,3} & V_{b,4} & \dots & V_{b,n} \end{bmatrix},$$

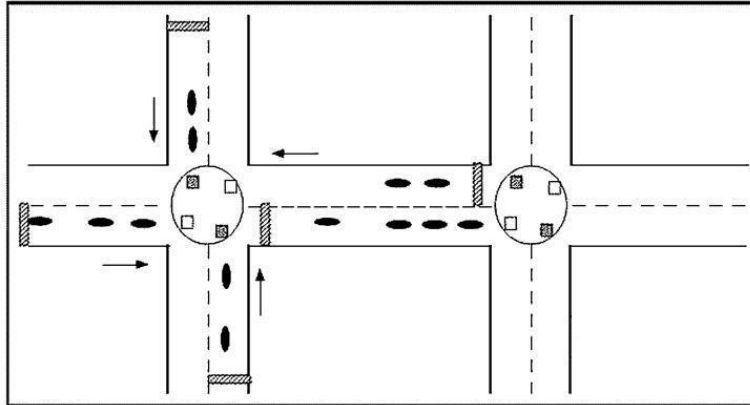
де $V_{i,0}$ – номер дороги на маршруті, на якій в поточний момент часу перебуває i -й транспортний засіб, $i = \overline{1, b}$; b – кількість транспортних засобів у мережі; $V_{i,1}$ – середня швидкість i -го транспортного засобу за відсутності перешкод; $V_{i,2}$ – коефіцієнт, який визначає активний пріоритет i -го транспортного засобу у вигляді цілого числа K , $K = \overline{1, 10}$; $V_{i,j}$, $j = \overline{3, n}$ – номери доріг, які задають повний маршрут руху i -го транспортного засобу, де n – максимальна довжина маршруту;

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{1,0} & L_{1,1} & \dots & L_{1,k} \\ L_{2,0} & L_{2,1} & \dots & L_{2,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{m,0} & L_{m,1} & \dots & L_{m,k} \end{bmatrix},$$

де $L_{i,0}$ – кількість транспортних засобів, які перебувають на i -й дорозі, $i = \overline{1, m}$, де m – кількість доріг у мережі; $L_{i,j}$ – номер транспортного засобу, який перебуває в j -й позиції на i -й дорозі, $j = \overline{1, k}$; k – максимальна кількість позицій на дорозі.

Таким чином, наявність транспортного засобу з індексом r на відрізку j на смузі руху i задається як $L_{i,j} = r$.

Приклад топології транспортної мережі показано на рисунку.



Топологія транспортної мережі та розміщення датчиків руху: – транспортний засіб; – дорожній контролер; – датчик руху

Рівняння стану системи для окремо взятого перехрестя має вигляд

$$\mathbf{X}[k+1] = f(\mathbf{X}[k], \mathbf{A}),$$

де k – k -й момент часу; $\mathbf{X}[k]$ – матриця стану системи; $\mathbf{A}$ – матриця індексів, які надходять у систему транспортних засобів, задається аналогічно матриці $\mathbf{V}$.

Матриця стану системи окремо взятого перехрестя має вигляд

$$\mathbf{X}[k] = \begin{bmatrix} d[k] \\ d[k-1] \\ \mathbf{V}[k] \\ \mathbf{L}[k] \end{bmatrix},$$

де $d[k]$ – номер поточної фази; $d[k-1]$ – номер попередньої фази (необхідний для врахування затримки, яка викликана наявністю жовтого світла світлофора у разі перемикання з червоного на зелений сигнал); $\mathbf{V}[k]$ – матриця транспортних засобів у момент часу k ; $\mathbf{L}[k]$ – матриця стану доріг у момент часу k .

Визначимо перехрестя мережі як транспортну розв'язку на одному рівні (перехресті). Маршрут руху транспортного засобу задається як послідовність доріг, які проходить цей транспортний засіб. Взаємодія транспортних засобів передбачає рух транспортного засобу по маршруту за відсутності перешкод у вигляді перехресть або інших транспортних засобів. Рух можливий, якщо на відстані $\bar{s}_\Delta$ перед транспортним засобом немає інших нерухомих транспортних засобів. У випадку, коли на відстані $\bar{s}_\Delta$ перебуває транспортний засіб і рухається зі швидкістю v_p , транспортний засіб, що рухається по маршруту, може мати швидкість v ($v \leq v_p$). Транспортний засіб, входячи в систему, потрапляє на дорогу і рухається по ній до зустрічі з перешкодою. Зупинившись, транспортний засіб тим самим

приєднується до черги на відповідній дорозі й очікує можливості подальшого руху по дорозі або переходить на наступну по маршруту дороги. Оскільки довжина дороги лімітована, то в разі її заповнення перехід на цю дорогу не можливий, і транспортний засіб, якому необхідно по маршруту потрапити на цю дорогу, вимушений очікувати можливості переходу.

Рух усіх транспортних засобів у мережі однозначно визначено: для кожного транспортного засобу задаються його місцеперебування в момент входу в систему, швидкість і маршрут як послідовність доріг. Довжини черги для кожної дороги та інформація про прибуття транспортного засобу на цю дорогу, потрібні дорожньому контролеру, можуть бути отримані декількома способами: датчиками руху, розміщеними на вхідних дорогах до перехрестя, комбінацією датчиків руху, розміщених на вхідних і вихідних дорогах, або через камери спостереження, такі як AUTOSCOPE. Можна також застосовувати петлі індуктивності, умонтовані в дорожнє полотно, але такі датчики малоінформативні, оскільки не дозволяють класифікувати транспортний засіб.

У разі, якщо не можна встановити датчики, можуть функціонувати системи за статистичними даними, отриманими за даними спостереження для знаходження співвідношення інтенсивності фаз світлофорів на окремо взятих перехрестях.

Додатково можна задавати активні й пасивні пріоритети в русі. Активні пріоритети задаються як тимчасові затримки $V_{i,a}|_{i=1,2}$ для кожного транспортного засобу під час розрахунку сумарних затримок у русі транспорту і являють собою значущість певного типу транспортного засобу. Пасивні пріоритети задаються як вагові коефіцієнти затримок $0 \leq p_i \leq 1|_{i=1,m}$ для кожної дороги і є мірою значущості – завантаженості певного відрізка смуги руху.

Рух по магістралях (за заданим маршрутом) регулюється заданням пасивних пріоритетів для доріг, які входять у магістраль. Вибір вагових коефіцієнтів ґрунтується на макроскопічному розгляді мережі (експертна оцінка значущості завантаженості окремих ділянок мережі), русі транспортних засобів транзиту, а також даних, отриманих від датчиків руху.

Загальний час затримки, необхідний для того, щоб усі транспортні засоби, які стоять на вхідних дорогах до перехрестя, покинули його без поповнення кількості транспортних засобів:

$$u^*[d] = \min_{d \in D} t_{\Sigma}(d), \quad (1)$$

де $t_{\Sigma}(d)$ – час перебування транспортних засобів на вхідних дорогах до перехрестя без поповнення їх кількості за заданого плану зміни фаз: час, необхідний для того, щоб усі транспортні засоби в поточний час очікування проходження перехрестя покинули його.

Використання критерію оптимальності базується на обсязі отриманої інформації від датчиків руху і необхідності задання пріоритетів у русі.

Стандартна комплектація технічних засобів, необхідних для вирішення цього завдання в реальних умовах: світлофор, датчик руху (кількість транспортних засобів), дорожній контролер.

Мета завдання полягає в тому, щоб за даними, отриманими від датчиків транспортних засобів, розробити алгоритм зміни фаз стану світлофорів на кожному окремому перехресті відповідно до вибраного критерію.

Алгоритм керування дорожнім рухом на перехресті. Адаптивно-циклічні системи базуються на визначенні плану зміни фаз. Ці системи змінюють такі параметри, як довжина циклу зміни фаз і розподілення зеленого світла в межах цього циклу. Оновлення параметрів зазвичай виконуються з частотою 5–10 хв. Як приклад можуть бути системи SCOOT [2] і SCATS [3]. Система SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimizer) оптимізує довжину циклу і розподілення зеленого світла, тим самим мінімізує затримки; рух транспортних засобів у черзі моделюється подібно автономній схемі TRANSYT. SCATS (The Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System), оптимізує довжину циклу і розподілення зеленого світла, щоб підтримати вищу прохідну здатність транспортної мережі.

Адаптивно-нециклічні системи, такі як UTOPIA [4], PROLYN [5], SPPORT [6], OPAC [7], оптимізують рух у мережі, не будучи обмеженим циклічним планом зміни фаз (хоча циклічний план не забороняється). Принцип їх функціонування полягає в отриманні в реальному часі даних про транспортні засоби, визначення оптимального плану зміни фази його втілення. Такі системи мають потребу в інформації про рух транспортних засобів, що прибувають. Друга запропонована схема – COP (Controlled Optimization of Phases). Це децентралізована адаптивна схема керування рухом, на перехресті в якій інформація, отримана від датчиків руху, використовується для розрахунку часу прибуття транспортного засобу до перехрестя, на основі якого програмований дорожній контролер визначає оптимальний план зміни фаз.

У зв'язку з труднощами щодо точного прогнозу часу прибуття транспортного засобу до перехрестя використання алгоритму «закатного горизонту» (Rolling Horizon) для таких схем виправдано. Досліди [8] показали, що достатньо навіть відносно коротких періодів прогнозу.

В UTOPIA і PROLYN та за двох інших підходів, які використовують Rolling Horizon, кожен дорожній контролер бере до уваги затримки, розраховані дорожніми контролерами сусідніх перехресть. Отже, можна досягти координації між суміжними перехрестями.

У роботі для оптимізації критерію (1) використовується метод перебору.

Висновки. Для поставленого завдання керування дорожнім рухом запропоновано адаптивний алгоритм керування світлофором на перехресті на підставі використання методу перебору.

Список літератури

1. *Building the IT1: Putting the National Architecture into Action*, tech. rep., U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, April 1996. – 188 p.
2. *Robertson D. L.* Optimizing networks of traffic signals in real time-the SCOOT method, IEEE Transactions on Vehicular Technology / D. L. Robertson, R. D. Bretherton. – 1991. – 1115 p.
3. *Lowrie P. R.* SCATS: A Traffic Responsive Method of Controlling Urban Traffic Control / P. R. Lowrie // Roads and Traffic Authority, 1992. – Режим доступу: <http://library.its.berkeley.edu/>
4. *Mauro V.* “UTOPIA,” in Control, Computers, Communications in Transportation: selected papers from the IF AC Symposium / V. Mauro, C. D. DiTaranto. – Paris: Pergamon Press, 1990. ^А – P. 245–252.
5. *The PROLYN real time traffic algorithm:* in 4th IFAC-IFIP-IFORS Conference on Control in Transportation System, (Baden-Baden, Germany) / J. J. Henry, J. L. Farges, J. Tuffal – 1983. – P. 307–312.
6. *Yagar S.* A procedure for real-time signal control that considers transit interference and priority / S. Yagar, B. Han // Transportation Research-B. – Vol. 28. – 1994. – P. 315–331.
7. *Gartner N. H.* “OPAC,” in Control, Computers, Communications in Transportation: selected papers from the IF AC Symposium / N. H. Gartner. – Paris: Pergamon Press, 1990. – P. 241–244.
8. *Bell M. G. H.* The optimisation of traffic signal control over a rolling horizon / M. G. H. Bell, D. W. Brookes Transportation Systems. – IFAC, 1994. – P. 1013–1018.

В. С. Грищенко

Оптимальное управление дорожным движением на перекрестке

Рассмотрен вопрос построения системы автоматизированного управления дорожным движением на перекрестке, которая работает по адаптивному методу. Разработан алгоритм управления длительностью фаз.

V. S. Grischenko

Optimal traffic control at crossroads

Considered the problem of constructing a system of automated traffic management, traffic at the intersection, which operates on the adaptive method. Developed the algorithm controls the duration of phases.