

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Введение

Введение светофорного регулирования ликвидирует наиболее опасные конфликтные точки, что способствует повышению безопасности движения. Вместе с тем появление светофора на перекрестке, вызывает транспортные задержки даже на главной дороге, порой весьма значительные из-за, характерной для этой дороги высокой интенсивности движения и жесткого программного регулирования. Таким образом, введение светофорного регулирования требует разработки системы управления светофорной сигнализацией в соответствии с данной топологией транспортной сети и критериями оценки ее эффективности.

В данной работе будет затронут лишь алгоритм управления, т.к. выбор технических средств всегда осуществляется в соответствии с законами управления.

Постановка задачи

Топология транспортной сети задается в виде множества пересечений $\text{int} = \{\text{int}_i\}$, и множества связей $l = \{l_i\}$, входящих и исходящих из каждого пересечения. Каждая связь представляет собой полосу движения и положение транспортных средств на ней рассматривается на дискретных промежутках, равных

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

где: \overline{s}_Δ – среднее расстояние между автомобилями;

\overline{s}_v – средняя длина автомобиля.

На каждом пересечении задано множество доступных фаз для светофоров (фаза состояния светофора F_d задается ее порядковым номером как элемент множества $F = \{F_d\}$ вариантов состояний светофоров, определяющий потоки транспортных средств, которые могут проехать через пересечение). Время в системе дискретно, продолжительность фазы светофора определяется количеством последовательных фаз F_d с одинаковым номером d [1]. Транспортному средству при поступлении в систему присваивается номер (индекс) по которому оно может быть идентифицировано. Индекс, положение и маршрут транспортного средства описываются матрицей V , а номер связи и наличие транспортных средств на ее участках – матрицей L . Матрицы V и L задаются следующим образом:

© Е.И. Чумаченко, Р.Ф. Тищенко, 2008

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

где: $V_{i,0}$ – номер связи в маршруте, на которой в данный момент находится i -е транспортное средство, $i = \overline{1, b}$, где b – количество транспортных средств в сети;

$V_{x,1}$ – средняя скорость i -го транспортного средства при отсутствии препятствий;

$V_{i,2}$ – коэффициент, определяющий активный приоритет i -го транспортного средства в виде целого числа K , $K = \overline{1, 10}$;

$V_{i,j}$, $j = \overline{3, n}$ – номера связей, задающие полный маршрут движения i -го транспортного средства, где n – максимальная длина маршрута.

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

где: $L_{i,0}$ – количество транспортных средств, находящихся на i -й связи, $i = \overline{1, m}$, где m – количество связей в сети;

$L_{i,j}$ – номер транспортного средства, находящегося на j -й позиции i -й связи, $j = \overline{1, k}$, где k – максимальное число позиций на связи.

Таким образом, наличие транспортного средства с индексом r на участке j полосы движения i задается как $L_{i,j} = r$.

Пример топологии транспортной сети приведен на рис. 1.

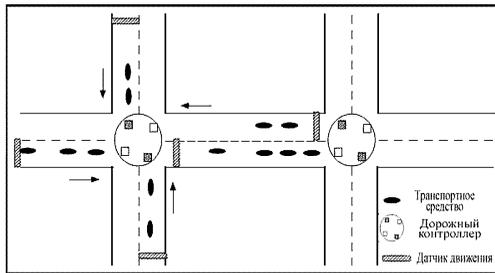


Рис. 1 – Топология транспортной сети и расположения датчиков движения

Уравнение состояния системы для отдельно взятого пересечения имеет вид:

$$\mathbf{X} [k + 1] = f (\mathbf{X} [k], \mathbf{A}), \quad (3)$$

где: k – k -й момент времени;

$\mathbf{X} [k]$ – матрица состояния системы;

\mathbf{A} – матрица индексов поступающих в систему транспортных средств, задается аналогично матрице \mathbf{V} .

Матрица состояния системы для отдельно взятого пересечения имеет вид:

$$\mathbf{X} [k] = \begin{bmatrix} d [k] \\ d [k - 1] \\ \mathbf{V} [k] \\ \mathbf{L} [k] \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где: $d [k]$ – номер текущей фазы;

$d [k - 1]$ – номер предыдущей фазы (необходим для учета задержки, вызванной наличием желтого света светофора при переключении с красного на зеленый);

$\mathbf{V} [k]$ – матрица транспортных средств в момент времени k ;

$\mathbf{L} [k]$ – матрица состояния связей в момент времени k .

Определим пересечение сети как транспортную развязку в одном уровне (перекресток). Маршрут движения транспортного средства задается как последовательность связей, проходимых данным транспортным средством. Без потери общности положим, что движение однополосное. Взаимодействие транспортных средств предусматривает движение транспортного средства по маршруту в отсутствие препятствий в виде пересечений или других транспортных средств. Движение возможно при отсутствии на расстоянии \bar{s}_Δ перед транспортным средством других неподвижных транспортных средств. В случае, когда на расстоянии \bar{s}_Δ находится транспортное средство, движущееся со скоростью v_p , рассматриваемое транспортное средство может двигаться со скоростью v ($v \leq v_p$). Транспортное средство при входе в систему попадает на определенную связь и двигается по ней до встречи с препятствием. Остановившись, транспортное средство тем самым присоединяется к очереди на соответствующей связи, и ожидает возможности дальнейшего движения по связи либо перехода на следующую по маршруту связь. Поскольку длина связи лимитирована, при ее наполнении переход на данную связь невозможен и транспортные средства, которым необходимо по маршруту перейти на эту связь, вынуждены ожидать возможности перехода.

Движение всех транспортных средств в сети однозначно определено: для каждого транспортного средства заданы его местоположение в момент входа в систему, скорость и маршрут, как последовательность связей. Длины очереди для каждой связи и информация о прибытии транспортных средств на данную связь, требуемые дорожному контроллеру, могут быть получены несколькими путями: датчиками движения, расположенными на входящих связях к пересечению, комбинацией датчиков движения, расположенных на входящих и исходящих связях, или через камеры наблюдения, такие как AUTOSCOPE [2]. Возможно также применение петель индуктивности, монтируемых в дорожное полотно, но такие датчики малоинформативные, поскольку не позволяют классифицировать транспортное средство.

При отсутствии возможности установки датчиков возможно функционирование системы по статистическим данным, полученным по данным наблюдений, с целью получения процентного соотношения интенсивности фаз светофоров на отдельно взятых пересечениях.

Дополнительно могут быть заданы активные и пассивные приоритеты в движении. Активные приоритеты задаются, как временные задержки $V_{i,a}|_{i=1,2}$ для каждого транспортного средства при расчете суммарных задержек в движении транспорта, и представляют собой меру важности данного типа транспортных средств. Пассивные приоритеты задаются как весовые коэффициенты задержек $0 \leq p_i \leq 1|_{i=1,m}$ для каждой связи и представляют собой меру значимости загруженности данного участка полосы движения.

Движения по магистралям (заданным маршрутам) дополнительно регулируется путем задания пассивных приоритетов для связей, которые входят в магистраль. Весовые коэффициенты отобраны основываясь на макроскопических рассмотрений сети (экспертная оценка важности загруженности определенных участков сети) и движении транспортных средств транзита (муниципальный транспорт).

Для оценки эффективности критериев использовалось моделирование транспортных потоков на участке транспортной сети, представленной на рис. 2.

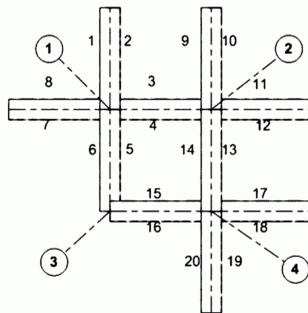


Рис. 2 – Пример транспортной сети

Цель задачи состоит в том, чтобы по заданной топологии транспортной сети и интенсивности отдельных потоков движения выбрать критерий оптимальности, который бы минимизировал транспортные задержки на всей сети в целом.

Критерии оптимальности

Использование определенного критерия оптимальности базируется на объеме получаемой информации от датчиков движения и необходимости задания приоритетов в движении.

Критерием оптимальности $u[d]$ выбора фазы $F_d \in \mathbf{F}$ на отдельно взятом пересечении могут выступать:

1) суммарное количество транспортных средств на множестве входящих связей в пересечении при задании пассивных и активных приоритетов соответственно:

$$u^*[d] = \min_{d \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{B}} p_i L_{i,0}, \quad (5)$$

$$u^*[d] = \min_{d \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{B}} \sum_{j=1}^{len_i} V_{(L_{i,j}),a}, \quad (6)$$

где: d – номер текущей фазы;

\mathbf{D} – множество допустимых значений номера фаз для данного пересечения;

\mathbf{B} – множество индексов связей, входящих в данное пересечение;

p_i – весовой коэффициент, выражающий пассивный приоритет i -й связи в движении, $i = \overline{1, m}$;

len_i – максимальное количество транспортных средств на i -й связи: $len_i = \frac{s_i}{\Delta s}$, где s_i – длина i -й связи, $i = \overline{1, m}$.

2) суммарное заполнение входящих связей транспортными средствами:

$$u^*[d] = \min_{d \in \mathbf{D}} \frac{\sum_{i \in \mathbf{B}} p_i \frac{L_{i,0}}{len_i}}{N}, \quad (7)$$

где: N – количество входящих связей для данного пересечения (обычно $N = 4$).

Наиболее объективным является критерий (7) поскольку он учитывает задержки всех транспортных средств используя принцип Вальда (принцип максимина), но для его осуществления требуется, чтобы контроллер располагал информацией о дальнейшем направлении движения всех транспортных средств очереди, что возможно лишь в условиях моделирования и неосуществимо на практике.

Также, иногда наряду с задержками учитывают количество остановок при движении.

Виды датчиков движения

Использование конкретных критериев оптимальности зависит от объема данных о транспортных средствах, получаемых от датчика движения. Возможно применение нескольких типов датчиков: петли индуктивности, монтируемые в дорожное полотно; пары фотодатчиков, расположенные на входах и выходах к пересечению; и видеодатчики с системой распознавания образов.

Датчики первого типа, петли индуктивности, монтируются в дорожное полотно на всех подходах к пересечению. Расстояние от стоп-линии

до конца датчика есть зона его действия длиной s_l . Датчики монтируются под каждую полосу движения, что дает информацию о намерениях водителя относительно направления движения согласно занимаемой им полосы. Датчики могут предоставить информацию о наличии транспортных средств по полосам движения и об их количестве, не превышающем $N_l = \frac{s_l}{\Delta s}$. Пример расположения датчиков первого типа показан на рис. 3.

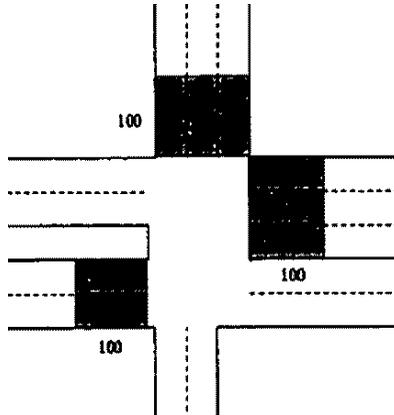


Рис. 3 – Расположение датчиков первого типа на пересечении магистрали с дорогой с односторонним движением, дина зоны чувствительности – 100 метров

Датчики данного типа не способны предоставить информацию о виде транспортного средства для задания активных приоритетов за исключением случаев, когда транспортное средство по длине занимает промежуток $k\Delta s$ и интерпретируется датчиком как k транспортных средств. Также датчики данного типа не способны предоставить информацию об объективной длине очереди когда длина очереди превышает длину зоны действия датчика.

Датчики второго типа, пары фотодатчиков, располагаются попарно на стоп-линии и на некотором расстоянии от нее, обычно – на выезде с предыдущего пересечения. Фотодатчики располагаются либо сбоку либо над дорожным полотном; во втором случае возможно получить информацию о движения транспортных средств для каждой полосы. Такие датчики могут предоставить информацию о количестве транспортных средств на всей полосе движения, но не могут предоставить информацию об их распределении по длине полосы: какие транспортные средства стоят в очереди а какие движутся. Также датчики не способны различить тип транспортного средства и, в большинстве случаев, его скорость. Датчика второго типа не предоставляют информации о распределении транспортных средств по полосам движения на подходе к пересечению и

могут лишь регистрировать исходящие транспортные потоки по каждой полосе, что не дает информации о намерениях водителя относительно дальнейшего направления движения. В связи с этим, для получения информации о направлении дальнейшего движения и о полном количестве автомобилей в очереди используется комбинация датчиков первого и второго типа, представленная на рис. 4.

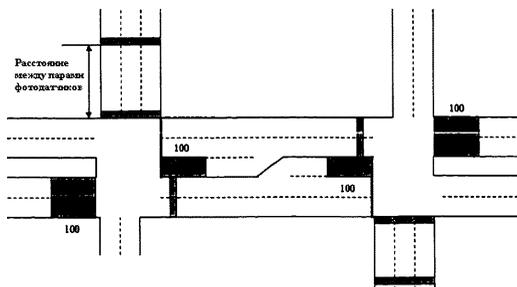


Рис. 4 – Расположение датчиков первого типа (указана зона действия датчика) и второго типа на пересечении магистрали с двумя дорогами с односторонним движением

Датчики третьего типа, видеодатчики с системой распознавания образов, располагаются на пересечении когда обеспечена достаточный обзор прилегающей части дорог и способны предоставить информацию о количестве, типе, скорости и местоположении транспортных средств в пределах зоны видимости. Данные датчики наиболее информативны, однако наряду с этим наиболее сложные и дорогостоящие.

Поскольку в данном исследовании применяется моделирование транспортных потоков, то доступна вся информация о транспортный средствах в сети, что соответствует использованию датчиков третьего типа с охватом зоной из видимости всей транспортной сети. Выбор критерия оптимальности при использовании датчиков первого и второго типа требует отдельного исследования и более совершенного алгоритма моделирования движения транспорта в сети.

Реализация критериев

В зависимости от используемых датчиков движения и типа светофорной сигнализации возможны несколько вариантов реализации критериев оптимальности.

Критерий (5) учитывает только пассивные приоритеты в движении, т.е. приоритет направления движения. Для его реализации необходима информация о количестве транспортных средств на связи, для чего подойдут датчики 2-го и 3-го типа. Датчики 1-го типа подойдут в случае комбинированного использования их наряду с датчиками 2-го типа, либо когда зона действия датчика достаточно велика. Возможно 3 варианта реализации критерия:

1) Для определения следующей фазы движения используются текущие данные;

Для определения следующей фазы движения используются данные через интервал времени $k\Delta t$, где Δt – период дискретизации системы [3], для нахождения которых принимается, что на все связи, входящие в данное пересечение, не поступают транспортные средства, а последовательность смен фаз за этот период выбирается из всех возможных вариантов такой, чтобы:

2) значение критерия в момент времени $k\Delta t$ было минимальным:

$$u^* [d] = \min_{d \in \mathbf{D}} \sum_{i \in \mathbf{B}} p_i L_{i,0} [T] \Bigg|_{T=k\Delta t} ;$$

3) сумма значений критерия для каждого момента времени $j\Delta t |_{j=1..k}$ была минимальной:

$$u^* [d] = \min_{d \in \mathbf{D}} \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i \in \mathbf{B}} p_i L_{i,0} [T] \Bigg|_{T=j\Delta t} \right).$$

Критерий (6) учитывает только активные приоритеты, т.е. приоритет типа транспортных средств. Он может использоваться только наряду с критерием (5). Его применение дает возможность учесть приоритет движения различных типов транспортных средств. Поскольку данный критерий вводит коэффициент временной задержки для каждого типа транспортных средств, полученная в результате общая задержка для каждого транспортного средства представляет собой не время, а относительную меру значимости задержки данного транспортного средства. В связи с этим эффективность критериев (5) и (6) сравнить напрямую нельзя.

Критерий (7) учитывает только пассивные приоритеты в движении. Для его реализации необходима информация о количестве транспортных средств на связи, для чего подойдут датчики 2-го и 3-го типа. Возможно 3 варианта реализации критерия:

1) Для определения следующей фазы движения используются текущие данные;

Для определения следующей фазы движения используются данные через интервал времени $k\Delta t$, где Δt – период дискретизации системы, для нахождения которых принимается, что на все связи, входящие в данное пересечение, не поступают транспортные средства, а последовательность смен фаз за этот период выбирается из всех возможных вариантов такой, чтобы:

2) значение критерия в момент времени $k\Delta t$ было минимальным:

$$u^* [d] = \min_{d \in \mathbf{D}} \frac{\sum_{i \in \mathbf{B}} p_i \frac{L_{i,0}[T]}{len_i}}{N} \Bigg|_{T=k\Delta t} ;$$

3) сумма значений критерия для каждого момента времени $j\Delta t|_{j=1..k}$ была минимальной:

$$u^* [d] = \min_{d \in D} \sum_{j=1}^k \left(\frac{\sum_{i \in B} p_i \frac{L_{i,0}[T]}{len_i}}{N} \right) \Bigg|_{T=j\Delta t}$$

Результаты моделирования

Для оценки критериев оптимальности проводилось моделирование транспортных потоков. Для принятия решения переключения фаз светофоров использовалась упрощенная версия алгоритма ALLONS-D [4]. Алгоритм ALLONS-D [5] использует полное дерево возможных решений переменной глубины вплоть до полного освобождения пересечения от транспортных средств; в качестве критерия оптимальности в нем выступает суммарное время, необходимое для того, чтобы все транспортные средства, ожидающие прохождение через пересечение, пройдут через него. В используемом далее алгоритме введены существенные упрощения, позволяющие уменьшить объем вычислений и упростить анализ промежуточных результатов.

В качестве примера взята сеть из 4-х пересечений и 20-и связей, топология которой приведена на Рисунке 2. На 1-м, 2-м и 4-м пересечении задано 6 возможных фаз без конфликтов в прохождении пересечения. В данной сети заданы 5 случайных потоков из 30-и видов транспортных средств. При моделировании транспортной системы для каждого вида транспортных средств задается вероятность, с которой транспортное средство может появиться на входе системы (в процентах в пределах маршрута), условная скорость (в участках связи за интервал времени Δt), и маршрут (в виде последовательности проходимых связей). Интенсивность транспортных потоков была задана достаточно низкой, что бы избежать переполнения связей между пересечениями.

В качестве меры эффективности критерия выбрано среднее время прохождения сети каждым транспортным средством. Параметр k (количество интервалов времени, для которых вычисляется значение критериев 5.2, 5.3, 7.2, 7.3) было принято равным 5. Интервал времени для выхода системы моделирования в установившееся состояние был принят равным $500\Delta t$. Интервал времени, в течение которого были получены результаты - $500\Delta t$.

Результаты исследования приведены в таблице 1:

Как видно, критерий 7.2 обеспечивают наиболее быстрое прохождение транспортными средствами сети. В целом, различие задержек транспортных средств при использовании различных критериев невелико.

Заключение

Среди предложенных вариантов реализации критериев наименьшая задержка наблюдается при вычислении значения критерия в момент

Результаты исследования

| Критерий | Среднее время прохождения сети по маршрутам | | | | | | Среднее геометрическое по 6 маршрутам |
|----------|---|-----------|-----------|------------|------------|------------|---------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 5.1 | 81 | 87 | 77 | 103 | 102 | 131 | 95.3 |
| 5.2 | 80 | 88 | 70 | 108 | 106 | 125 | 94.3 |
| 5.3 | 88 | 88 | 75 | 109 | 101 | 116 | 95.1 |
| 7.1 | 83 | 87 | 62 | 109 | 106 | 118 | 92.1 |
| 7.2 | 81 | 88 | 62 | 105 | 101 | 120 | 90.9 |
| 7.3 | 83 | 90 | 73 | 106 | 106 | 127 | 95.9 |

времени $k\Delta t$ при максимальном используемом значении k ($k = 5$). В силу того, что разница в средней задержке транспортных средств при $k = 1$ и $k = 5$ оказалась невелика, целесообразно использовать 1-й вариант реализации критериев: для определения следующей фазы движения использовать текущие данные. 3-й вариант реализации критериев оказался неэффективным ввиду плохой предсказуемости направления дальнейшего движения транспортных средств.

По результатам проведенного исследования было установлено, что для оптимизации дорожного движения с использованием децентрализованного алгоритма адаптивного управления, работающего по принципу ALLONS-D, достаточно ограничиться лишь рассмотрением вариантов смены фаз на один интервал времени вперед.

Литература

1. May A., “Some fixed-time signal control computer program”, Traffic Control and Transportation Systems, стр. 209-234, North-Holland Publishing, 1974.
2. Michalopoulos P.G., “Vehicle detection video through image processing: The autoscope system”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, том 40, стр. 21-29, 1991.
3. Bell M.G.H., Brookes D.W., “The optimisation of traffic signal control over a rolling horizon”, Transportation Systems, стр. 1013-1018, IFAC, 1994.
4. Синеглазов В.М., Тищенко Р.Ф., “Алгоритм магистрального управления дорожным движением”, Проблемы управления и информатики, 2, стр. 64-74, ISSN 0572-2691, 2007.
5. Porche I., Lafortune S. “Adaptive Look-ahead Optimization of Traffic Signals”, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109-2122, 1997.

Получено 13.04.2008