

ОПТИМИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА СЪЕЗДАХ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ

З.А. Черных, Н.Ю. Юдина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. В статье рассматривается возможность оптимизации движения транспортных средств на автомагистралях путем применения математической модели ассиметричной передачи ячеек (АКТМ). Методика проверена численно на данных, полученных на перегруженном участке автострады. Выполнено предварительное моделирование.

Ключевые слова: АКТМ, оптимизация движения, математическое моделирование, инфраструктура, магистраль

OPTIMIZATION OF VEHICLE MOVEMENT ON HIGHWAY RAMPS

Z.A. Chernykh, N.Yu. Yudina

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. The article considers the possibility of optimizing the movement of vehicles on highways by applying the mathematical model of asymmetric cell transmission (ACTM). The method is tested numerically on data received on a loaded section of a freeway. Preliminary modeling is performed.

Keywords: ACTM, traffic optimization, mathematical modeling, infrastructure, highway

Растущая загруженность городских автомагистралей – это факт, который не только очевиден для большинства пассажиров, но и хорошо документирован. На 2022 год годовая задержка в мире на одного пассажира увеличилась с 16 ч в 1982 году до 67ч в 2003 году. Ежегодные задержки на автострадах выросли с 0,7 млрд. часов до 3,7 млрд. часов, а доля заторов, относящихся к категории сильных или экстремальных, увеличилась с 12% до 40%. Для борьбы с этими тенденциями дорожные инженеры применяют различные меры, включая расширение инфраструктуры, предоставление услуг общественного транспорта и ряд оперативных усовершенствований, известных под общим названием интеллектуальных транспортных систем (ИТС). К числу оперативных стратегий, позволяющих улучшить работу автострады, относится дозирование на рампе, при котором регулируется поток автомобилей,

пропускаемых на автостраду, чтобы избежать аварийных ситуаций из-за перенасыщения.

Существует, по крайней мере, два сценария, при которых использование моделей первого порядка оправдано. Во-первых, когда "узкое место" находится в непосредственной близости от разворотной полосы. Такая ситуация встречается довольно часто, поскольку "узкие места" часто возникают из-за слияния транспортных потоков непосредственно перед парой "выездная полоса – въездная полоса". В этом случае оба механизма (падение пропускной способности и блокировка внеуличного движения) срабатывают более или менее одновременно и можно ожидать, что оптимальные планы для моделей первого и второго порядка будут одинаковыми (обе будут стремиться к минимизации заторов). Во-вторых, когда продолжительность периода заторов не может быть существенно изменена за счет учета рампы из-за ограничений по объему хранилища на рампе.

АКТМ является модифицированной версией модели "ячейка-передача" (КТМ) Даганзо. Важное различие между ними заключается в трактовке слияний транспортных потоков. Для управления смещением двух потоков используется дополнительный параметр (γ).

Участки автострады нумеруются от 0 до $I - 1$, начиная с самого верхнего по течению участка. Время делится на K интервалов длиной Δt . Ниже приведены наборы индексов участков и времени:

I – набор всех участков автомагистрали: $I = \{0 \dots I - 1\}$

K – множество временных интервалов: $K = \{0 \dots K - 1\}$

E – множество участков со съездами: $E \subseteq I$

E^+ – набор участков с регулируемыми съездами: $E^+ \subseteq E$

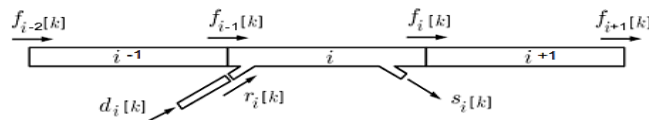


Рисунок 1 – Переменные модели

Все переменные трафика нормированы на единицы транспортных средств. Переменные потока $f_i[k]$, $r_i[k]$, $c_i[k]$, $d_i[k]$ и $s_i[k]$ представлены в виде количества автомобилей за интервал времени Δt . Переменные плотности $n_i[k]$ и $l_i[k]$ представляют собой количество автомобилей на магистральной и частях съезда участка i в момент времени $k \cdot \Delta t$. Определения каждой из этих величин приведены ниже.

$n_i[k]$ – количество автомобилей на участке i в момент времени $k \cdot \Delta t$.

$l_i[k]$ – количество автомобилей, стоящих в очереди на подъезде к участку $i \in E$ в момент времени $k \cdot \Delta t$.

$f_i[k]$ – количество автомобилей, перемещающихся с участка i на $i + 1$ в течении интервала k .

$r_i[k]$ – количество автомобилей, въезжающих на участок $i \in E$ с его съезды в течение интервала k .

$c_i[k]$ тариф учета для рампы $i \in E^+$.

$d_{i[k]}$ – спрос на проезд $i \in E$.

$s_i[k]$ – количество автомобилей, использующих съезд с дороги i в течение интервала k .

Модель состоит из пяти основных компонентов: уравнений сохранения магистрального и напорного потоков, магистрального и напорного потоков, а также потока вне магистрали. Предполагается, что поток вне магистрали связан с магистральным потоком известным коэффициентом разделения $\beta_{i[k]} \in [0,1]$. Потоки вне съезда:

$$\begin{aligned} S_i[k] &= \beta_i[k] \cdot (S_i[k] + f_i[k]) \\ S_i[k] &= \frac{\beta_i[k]}{1-\beta_i[k]} \cdot f_i[k] = \frac{\beta_i[k]}{\bar{\beta}_i[k]} \cdot f_i[k] \end{aligned} \quad (1)$$

где $\bar{\beta}_i[k] \triangleq 1 - \beta_i[k]$ определено для упрощения уравнений. Также для удобства коэффициент разделения задается для каждого участка и устанавливается равным 0, если участок не содержит внеуличного движения. Особый случай $\beta_i[k] = 1$, когда потоки вне дороги не могут быть определены из уравнения (1), решается с помощью:

$$S_i[k] = \min\{\vartheta_i \cdot (n_i[k] + \gamma \cdot r_i[k]); \bar{S}_i\} \quad (2)$$

$f_i[k]$ – пропускная способность магистрали

$S_i[k]$ – пропускная способность съезда

γ – коэффициент смешивания набегающего потока $\in [0, 1]$

$\beta_i[k]$ – безразмерный коэффициент разделения $\in [0, 1]$

Магистральный расход рассчитывается, как и КТМ, как минимальное из того, что может отправить участок восходящего потока при максимальной скорости, и того, что может принять участок нисходящего потока. Ему присваивается наибольшее значение $f_{i[k]}$, которое удовлетворяет требованиям:

$$f_i[k] + s_i[k] \leq \vartheta_i \cdot (n_i[k] + \gamma \cdot r_i[k]) \quad (3)$$

$$f_i[k] \leq w_{i+1} \cdot (\bar{n}_{i+1} - n_{i+1}[k] - \gamma \cdot r_{i+1}[k]) \quad (4)$$

$f_i[k] \leq \bar{f}_i$ – пропускная способность магистрали и $s_i[k] \leq \bar{s}_i$ – пропускная способность съезда представляют собой ограничения пропускной способности магистрали и отвода.

Уравнение (3) ограничивает суммарный поток, который может покинуть участок i за интервал времени k в предположении, что транспорт движется со скоростью свободного потока v_i . Уравнение (4) гарантирует, что магистральный поток не превысит того, который может быть принят нижележащим участком. Правая часть этого уравнения представляет собой долю w_{i+1} от общего незанятого пространства на участке $i + 1$. С учетом уравнения (1) получаем выражение для магистрального потока:

$$f_i[k] = \min \left\{ \begin{array}{l} \bar{\beta}_i[k] \cdot \vartheta_i \cdot (n_i[k] + \gamma \cdot r_i[k]); \\ w_{i+1}(\bar{n}_{i+1} - n_{i+1} - \gamma \cdot r_{i+1}[k]); \\ F_i[k] \end{array} \right\} \quad (5)$$

Заметим, что уравнение (5) при $\gamma = 0$ аналогично уравнению СТМ для простого или дивергентного уравнения. В этом случае в качестве основного компонента используются соединения клеток и заданные проценты разворота. Аналогично основному Потоки на линии, потоки на рампе рассчитываются таким образом, чтобы не превышалось ни одно из следующих ограничений:

$r_i[k] \leq l_i[k] + d_i[k]$ – требование ограничения на $r_i[k]$ в связи с ограниченностью пространства на магистрали; $r_i[k] \leq \xi_i \cdot (\bar{n}_i - r_i[k])$ – магистральное пространство; $r_i[k] \leq c_i[k]$ – темп учета. Параметр $\bar{n}_i$ определяет распределение свободного пространства для автомобилей, въезжающих со съезда. Это приводит к следующему выражению для $r_i[k]$:

Потоки на съезде:

$$r_i[k] = \begin{cases} \min\{l_i[k] + d_i[k]; \xi_i(\bar{n}_i - n_i[k])\} \\ \min\{l_i[k] + d_i[k]; \xi_i(\bar{n}_i - n_i[k]); c_i[k]\} \end{cases} \quad (6)$$

Это уравнение потока на съезде по форме похоже на уравнение (4). Количество автомобилей на съезде и на магистрали изменяется в соответствии с уравнениями сохранения (7) и (8).

Сохранение въезда с начальным условием $l_i[0]$ и граничным условием $d_i[k]$.

$$l_i[k] = l_i[0] + d_i[k] - r_i[k] \quad (7)$$

Сохранение магистрали с начальным условием $n_i[0]$:

$$n_i[k + 1] = n_i[k] + f_{i-1}[k] + r_i[k] + r_i[k] - s_i[k] \quad (8)$$

Граничным условием для этого уравнения является поток, поступающий на первый участок магистрали $up[k]$. Он может быть представлен либо как предписанный магистральный поток, т.е. $(f - 1)[k] = up[k]$, либо как требование на фиктивный съезд, т.е. $d_0[k] = up[k]$ и $(f - 1)[k] = 0$. Второй способ предпочтительнее, так как он предотвращает переполнение участка восходящего потока. Уравнения (4), (6)-(8) составляют АКТМ. Единственное существенное отклонение от КТМ заключается в расчете сливающихся потоков. Подход, используемый в КТМ, заключается в выделении части свободного пространства в нижележащей принимающей ячейке и перемещении как можно большей части спроса из двух отправляющих ячеек в общее пространство. АКТМ, напротив, выделяет отдельное пространство для каждой объединяющейся ветви: w_i для магистрали и ξ_i для съезда. Затем потоки могут быть рассчитаны отдельно так же, как и простые соединения ячеек: по минимуму спроса, выделенного пространства и пропускной способности (или скорости учета въезда). Таким образом, невогнутые/невыпуклые функции $mid\}$ в КТМ заменяются вогнутыми функциями $\min\}$.

Метод был проверен численно с использованием геометрической схемы и требований к движению на 13-километровом участке автодороги в Воронежской области, содержащей 16 съездов, параметры АКТМ при расчетах были скорректированы. В результате скорость проезда участка была повышена на 12,6 км/ч, а время проезда сократилось на 32% в периоды повышенной загрузки автодороги и прилегающих съездов, но за счет водителей,

пользующихся этими съездами. Отметим, что оптимальная стратегия без ограничений очередей заключается в том, чтобы задержать большое количество автомобилей (в одном случае более 250) на нескольких съездах, чтобы шоссе практически не загружалось. Задача оптимизатора состоит в том, чтобы распределить нагрузку по управлению между несколькими съездами, а также скоординировать накопление и освобождение очередей на съездах таким образом, чтобы минимизировать заторы на требуемом участке автодороги.

Список литературы

1. Потапова, И.А. Методы моделирования транспортного потока // И.А. Потапова, И.Н. Бояршинова, Т.Р. Исмагилов // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 10–2. – С. 338–342.
2. Швецов, В.И. Математическое моделирование транспортных потоков / В.И. Швецов. – М.: Институт системного анализа РАН, 2019. – 52 с.
3. Wilensky U., Rand W. An Introduction to Agent-Based Modeling. Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. – 2019. – 504 p.
4. Banks, J. Are minimization of delay and minimization of freeway congestion compatible ramp metering objectives // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. – 1727. – 2020. – С. 112-119. – DOI: 10.3141/1727-14.
5. Zhang L., Levinson D. Optimal freeway ramp control without origin–destination information // Transportation Research. – Part B 38. – 2021. – С. 869-887. – DOI: 10.1016/j.trb.2003.11.003.
6. Wang J., May A.D. Computer model for optimal freeway on-ramp control // Highway Research Record. – 1973. – С. 469.

References

1. Potapova, I.A. Methods for modeling traffic flow // I.A. Potapova, I.N. Boyarshinova, T.R. Ismagilov // Fundamental research. – 2016. – No. 10–2. – P. 338–342.
2. Shvetsov, V.I. Mathematical modeling of transport flows / V.I. Shvetsov. – M.: Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences, 2019. – 52 p.
3. Wilensky U., Rand W. An Introduction to Agent-Based Modeling. Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. – 2019. – 504 p.
4. Banks, J. Are minimization of delay and minimization of freeway congestion compatible ramp metering objectives // Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board. – 1727. – 2020. – pp. 112-119. – DOI: 10.3141/1727-14.
5. Zhang L., Levinson D. Optimal freeway ramp control without origin–destination information // Transportation Research. – Part B 38. – 2021. – pp. 869-887. – DOI: 10.1016/j.trb.2003.11.003.
6. Wang J., May A.D. Computer model for optimal freeway on-ramp control // Highway Research Record. – 1973. – P. 469.
DOI: 10.58168/CISMP2024_785-787