

**ПРИМЕНЕНИЕ МАКРОСКОПИЧЕСКОЙ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ
ДИАГРАММЫ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ
СИСТЕМЫ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ
Г. ЦЗИНАНЬ КНР**

В.В. Зырянов, Х. Цзянг (Ростов-на-Дону)

Моделирование дорожного движения с использованием данных системы мониторинга является одним из основных направлений теоретических и практических исследований управления транспортными потоками и планирования транспортной инфраструктуры. Возрастание транспортной нагрузки, усложнение задач организации дорожного движения и ужесточение требований к достоверности прогнозов об изменении дорожно-транспортной ситуации вызывают необходимость постоянного изучения этих данных, и также разработки новых алгоритмов для систем управления.

С развитием информационно-коммуникационных технологий появилась основа для широкого распространения систем интеллектуального видеонаблюдения. В практической обстановке интегрируются транспортные данные об условиях движения и функционировании систем управления транспортными потоками.

Однако для городской улично-дорожной сети, со сложной структурой сети, неопределённостью маршрутизации транспортных потоков и многообразием методов управления дорожным движением, ситуация существенно усложняется. Сложность и особенности управления дорожным движением на городской улично-дорожной сети показаны в работах по исследованию сетевых макромоделей [1, 4, 5, 7, 11, 12].

Применение макромоделей для оценки состояния транспортного потока и условий функционирования городской улично-дорожной сети сопровождалось различными попытками преодолеть основные их ограничения. Двухкомпонентные макромоделей кинетической теории транспортного потока, учитывающие характеристики городской улично-дорожной сети, были разработаны Р. Херманом и И. Пригожиным [2, 8, 9, 10]. Такие макромоделей по аналогии транспортного потока с потоком двухкомпонентной жидкости ввели деление на движущийся и неподвижный поток. Нужно подчеркнуть, что неподвижным потоком считаются автомобили, простаивающие в дорожных заторах и на регулируемых пересечениях. Припаркованные автомобили к неподвижному потоку не относятся. Двухкомпонентные макромоделей удовлетворяют основным требованиям моделирования транспортных потоков для городской улично-дорожной сети, поскольку их параметры чувствительны к изменению геометрических характеристик сети и методов управления дорожным движением.

В представленной статье транспортные данные интеллектуального видеонаблюдения обработаны на основе двухкомпонентных макромоделей кинетической теории транспортного потока. При обработке данных мониторинга интеллектуального видеонаблюдения, с контролем на пересечениях участков улично-дорожной сети, автоматически собраны данные о времени поездки. С одной стороны, для таких статистических диаграмм рассеивания необходимо развить подходящие адаптивные алгоритмы. С другой стороны, вследствие преимущества работы интеллектуального видеонаблюдения автоматически определяется деление времени поездки.

Основная схема интеллектуального видеонаблюдения для детектирования транспортных данных приведена на рис. 1.

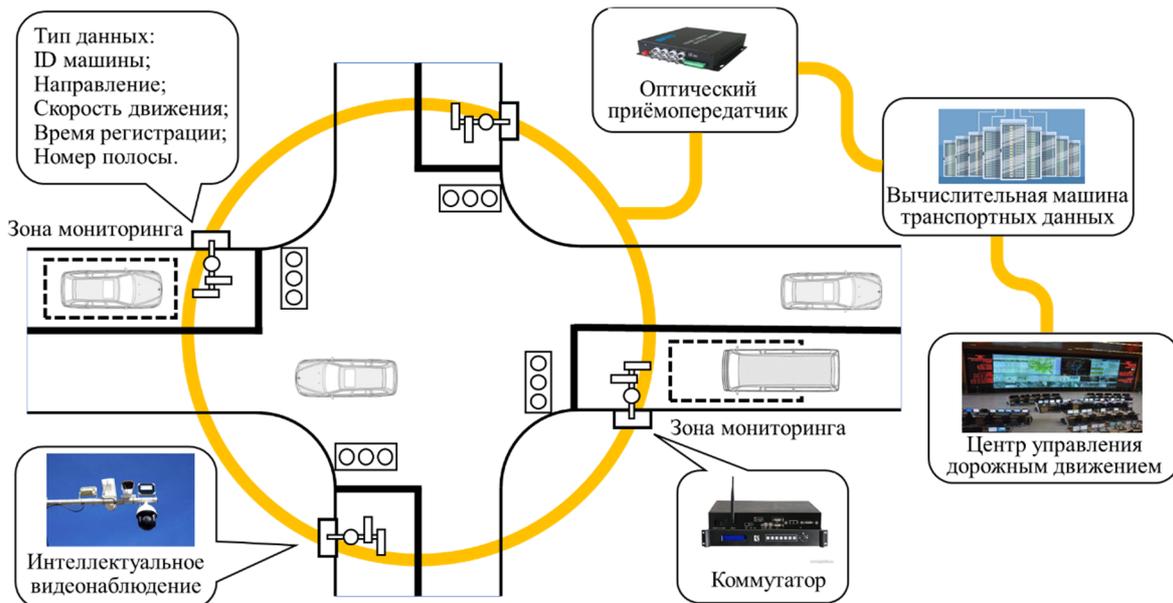


Рис. 1. Схема механизма работы дорожно-транспортного видеонаблюдения о детектировании транспортных данных

Для формирования параметров двухкомпонентных макромоделей используется разделение времени поездки на время движения и время остановки, применяя удельное время поездки в минутах на километр пути (мин/км). Затем для того, чтобы связать макромоделю с временем поездки, в первом приближении можно полагать долю одновременно остановившихся автомобилей равной отношению текущей плотности потока к максимальной или отношению времени остановки ко времени поездки. И для повышения их приспособляемости в городской улично-дорожной сети необходимо использовать поправочный коэффициент. В этом случае применения обобщенной макромоделю Пайпса используется поправочный коэффициент p из приведенного выше соотношения между плотностью и долей одновременно остановившихся автомобилей:

$$k = k_j \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{v_f} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (1)$$

$$q = k_j \cdot v \cdot \left[1 - \left(\frac{v}{v_f} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right]^{\frac{1}{p}}. \quad (2)$$

где

k – плотность транспортного потока;

k_j – максимальная плотность транспортного потока;

v – скорость транспортного потока;

v_f – скорость свободного движения;

q – интенсивность транспортного потока;

n – коэффициент макромоделю Пайпса;

p – поправочный коэффициент для учета пространственной неоднородности.

Для экспериментальной проверки выполнимости обобщенной макромоделю Пайпса с применением поправочных коэффициентов использовались данные интеллектуального видеонаблюдения на примере участка улично-дорожной сети

центральной части г. Цзинань (КНР), которые собирались в пиковый промежуток времени с 8:00 до 10:00.

В результате моделирования для данного участка сети максимальное значение интенсивности достигается при уровне плотности около 50 авт/км (в диапазоне от 40 до 60 авт/км). Графическое отображение зависимости между характеристиками транспортного потока – скоростью, интенсивностью и плотностью движения после этой обработки приведены на рис. 2.

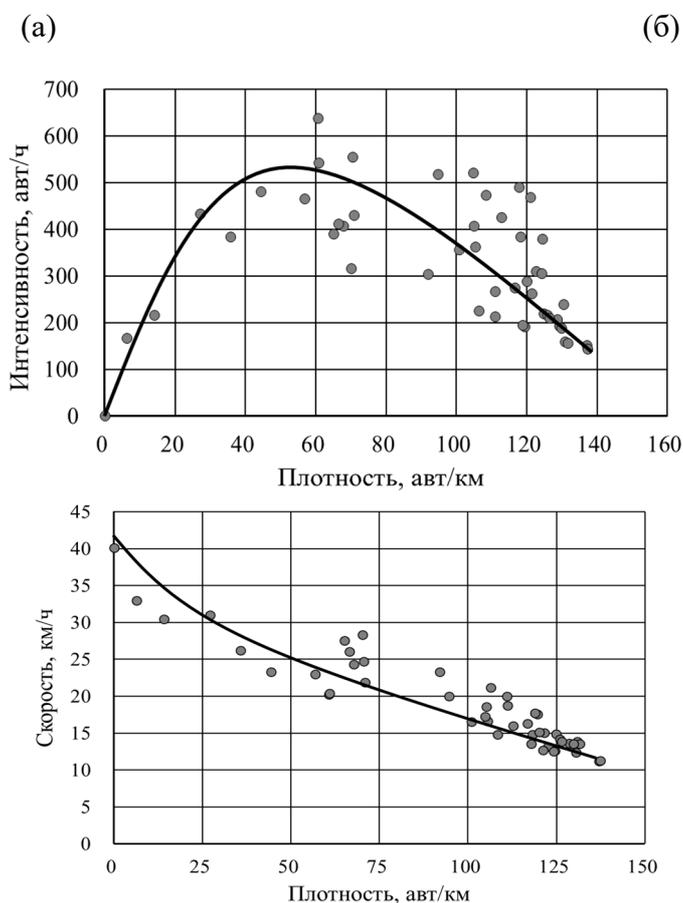


Рис. 2. Результаты моделирования по обобщенным макромоделям Пайпса с использованием поправочных коэффициентов: (а) зависимость между интенсивностью и плотностью, (б) зависимость между скоростью и плотностью.

Для моделирования дорожного движения на всей городской улично-дорожной сети применяется макроскопическая фундаментальная диаграмма транспортного потока (Macroscopic Fundamental Diagram – MFD), описывающая зависимости между интегральными характеристиками транспортного потока; ее параметры были сформированы в работах С. Даганзо и Н. Геролнимиса [3, 4, 6, 7].

Основные параметры для построения макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока состоят из следующих уравнений:

- **производительность** – общий пробег всех автомобилей в улично-дорожной сети за единицу времени:

$$P = \sum_{i \in \mathcal{Z}} q_i \cdot l_i, \quad (3)$$

где

P – производительность улично-дорожной сети, авт*км/ч;

q_i – интенсивность дорожного движения на i -м участке сети, авт*км/ч;

l_i – длина i -го участка сети, км;

z – общая длина сети, км;

Данный параметр представляет суммирование произведения интенсивности движения на каждом участке сети на длину этого участка. Также можно рассчитывать для каждой полосы движения с учетом интенсивности по полосам.

• **эффективность** – средняя интенсивность движения в улично-дорожной сети:

$$E = \frac{\sum_{i \in z} q_i \cdot l_i}{\sum_{i \in z} l_i}, \quad (4)$$

где

E – эффективность использования улично-дорожной сети, авт/ч.

Данный параметр определяется делением вышеуказанной производительности на общую длину сети, является взвешенной средней интенсивности движения. Также получается путем усреднения всех значений интенсивности движения и является невзвешенной средней интенсивностью движения. Взвешенное и невзвешенное значение этих параметров должно быть равно при всех одинаковых участках улично-дорожной сети. Однако взвешенное значение является более точным значением сравнительно с невзвешенным значением при практических обстановках городской улично-дорожной сети.

• **накопление** – число автомобилей в улично-дорожной сети:

$$A = \sum_{i \in z} k_i \cdot l_i, \quad (5)$$

где

A – накопление автомобилей в улично-дорожной сети, авт;

k_i – плотность дорожного движения на i -м участке сети, авт/км;

Данный параметр представляет суммирование произведения плотности движения на каждом участке сети на длину этого участка.

• **сетевая плотность** – средняя плотность в улично-дорожной сети:

$$K = \frac{\sum_{i \in z} k_i \cdot l_i}{\sum_{i \in z} l_i}. \quad (6)$$

где

K – сетевая плотность улично-дорожной сети, авт/км.

По аналогии с параметром эффективности сетевая плотность определяется делением вышеуказанного накопления на общую длину сети, она является взвешенной средней плотностью движения. Или получается путем усреднения всех значений плотности движения, является невзвешенной средней плотностью движения.

Для оценки макроскопической фундаментальной диаграммы транспортного потока использовались данные системы интеллектуального видеонаблюдения на примере фрагмента сети центральной части г. Цзинань по промежутку мониторинга с 6:00 до 10:00. Схема рассматриваемой улично-дорожной сети и дислокация 24 пунктов транспортных видеонаблюдений приведены на рис. 3. В соответствии с механизмом работы системы мониторинга на улично-дорожной сети первичные данные транспортных потоков были преобразованы в данные с опознавательными отметками.

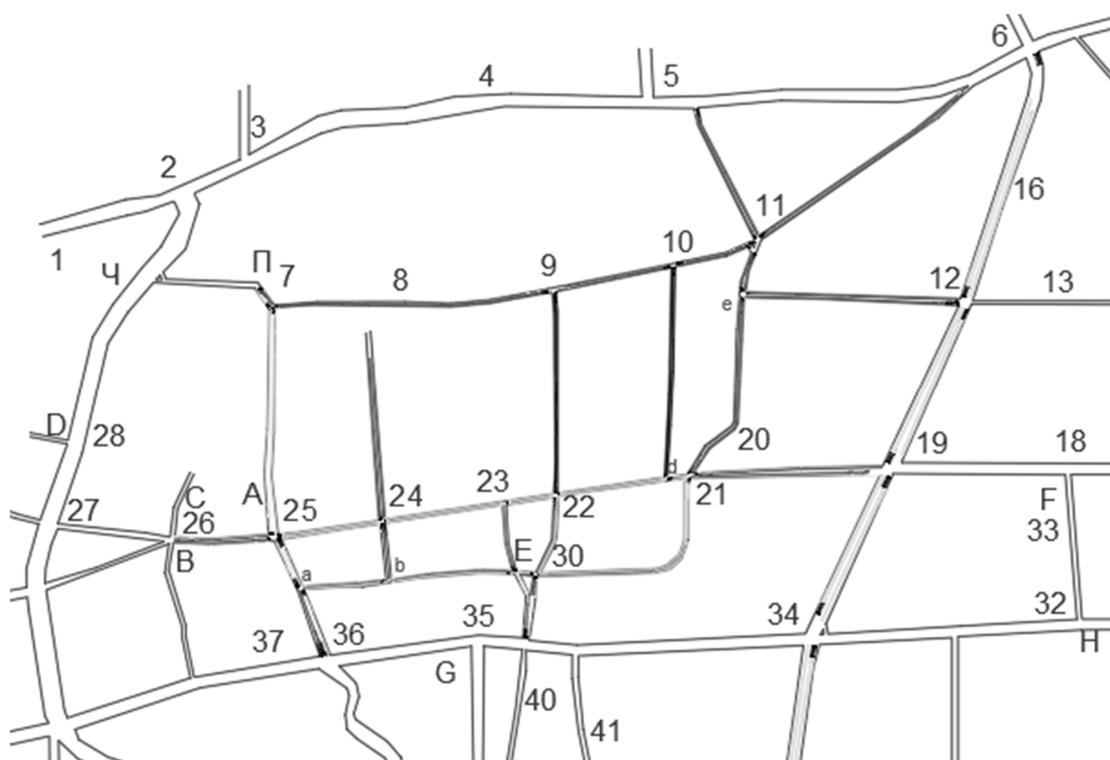


Рис. 3. Нумерация положения транспортных детекторов на рассматриваемом фрагменте сети центральной части г. Цзинань для моделирования дорожного движения

Для данного участка улично-дорожной сети максимальный объем производительности достигается 28000 авт*км/ч при уровне накопления около 2600 автомобилей в диапазоне от 2000 до 3000 автомобилей. Соответственно, что по уравнениям (4) и (6) максимальный объем эффективности достигается 580 авт/ч при уровне средней плотности около 55 авт/км в диапазоне от 50 до 60 авт/км.

В соответствии с этими данными получена макроскопическая фундаментальная диаграмма, имеющая динамические характеристики, где можно показать изменение параметров транспортного потока во времени. Построенные макроскопические фундаментальные диаграммы транспортного потока приведены соответственно на рис. 4.

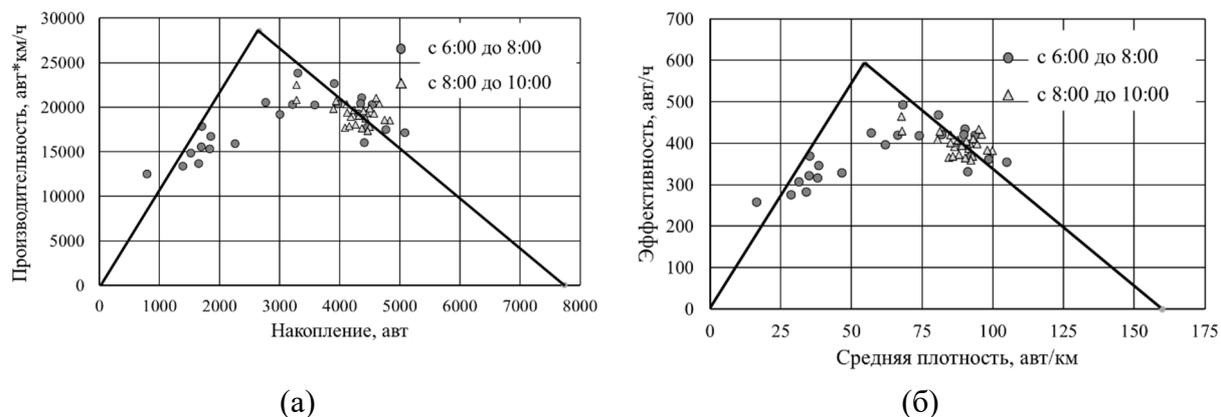


Рис. 4. Макроскопические фундаментальные диаграммы транспортного потока: (а) зависимость между производительностью и накоплением на улично-дорожной сети, (б) зависимость между эффективностью и средней плотностью на улично-дорожной сети

По разбросу круглых отметок в периоде времени с 6:00 до 8:00 сетевое состояние транспортного потока совершается переходом свободного и стабильного

условия в частичные заторы на участках сети. Сетевое состояние транспортного потока является свободным и стабильным условиям до уровня накопления около 2000 авт и соответственно средней плотности около 40 авт/км. При дальнейшем увеличении параметра накопления и средней плотности достигается пропускная способность сети, затем разрастается к частичным заторам на участках сети.

Очевидно, что по разбросу треугольных отметок в периоде времени с 8:00 до 10:00 сетевое состояние транспортного потока характеризуется частичными заторами на участках сети, соответственно в диапазоне накопления от 3200 до 4900 автомобилей и средней плотности от 65 до 100 авт/км. В следующем этапе имеется неизбежная тенденция к очереди блокировки и затору на всей сети. Поэтому при управлении дорожным движением в городах необходимо ограничивать сетевое состояние транспортного потока с высоким уровнем накопления автомобилей в сети и применять соответствующие стратегии управления [13].

Литература

1. **Boyaci B.** Exploring the effect of variability of urban systems characteristics in the network capacity / Boyaci B., Geroliminis N. // In: Transportation Research Board Annual Meeting, – 2011, Washington, DC.
2. **Chang M.F.** Trip time versus stop time and fuel consumption characteristics in cities / Chang M.F., Herman R. // «Transp. Sci.». 1981, vol.15, №3, p.183 – 209.
3. **Daganzo C.F.** Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches. / Daganzo C.F. // Transportation Research, Part B 41 (1), 2007, p.49 – 62.
4. **Daganzo C.F.** An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic / Daganzo C.F., Geroliminis N. // Transportation Research Part B 42 (9), – 2008, p.771 – 781.
5. **Daganzo C.F.** Macroscopic relations of urban traffic variables: bifurcations, multivaluedness and instability / Daganzo C.F., Gayah V.V., Gonzales E.J. // Transportation Research, Part B 45 (1), 2011, p.278 – 288.
6. **Geroliminis N.** Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings. / Geroliminis, N., Daganzo, C.F. // Transportation Research Part B 42 (9), 2008, p.759 – 770.
7. **Geroliminis N.** Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic / Geroliminis N., Sun J. // Transportation Research Part B 45 (3), – 2011, 605 – 617.
8. Herman R.A. two-fluid approach to town traffic / Herman R. Prigogine I. // «Science» – 1979, vol.204, p.148 – 151.
9. **Herman R.** Characterizing traffic conditions in urban areas / Herman R., Ardekani S.A. // «Transp. Sci.». 1984, vol.18, №3, p.101 – 139.
10. **Herman R.** Trip time-stop time studies of extreme driver behaviors / Herman R., Malakhoff L.A., Ardekani S.A. // «Transp. Res.». 1998, vol.22A, №6, p.427 – 433.
11. **Mazlounian A.** The spatial variability of vehicle densities as determinant of urban network capacity / Mazlounian A., Geroliminis N., Helbing D. // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 368 (1928), 2010, p.4627 – 4647.
12. **Zyryanov V.** Simulation Network-Level Relationships of Traffic Flow. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 698 (2019) 066049 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/698/6/066049.
13. **Зырянов В.В.** Исследование свойств сетевой основной диаграммы транспортного потока / Зырянов В.В. // Сборник докладов одиннадцатой международной конференции «Организация и безопасность дорожного движения в крупных

городах», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, 2014. С.66 – 72.