

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГЕТЕРОГЕННОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ ПОДХОДА КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Н.В. Быков (Москва)

### Введение

Прогресс в развитии индивидуального автомобильного транспорта характеризуется ростом числа разработок в области беспилотных транспортных средств (ТС), предназначенных для автоматического движения по автомобильным дорогам. Повсеместное внедрение беспилотных ТС может наступить в промежутке от нескольких лет до нескольких десятков лет. Согласно современным концепциям транспортных систем умного города беспилотные ТС могут взаимодействовать с дорожной инфраструктурой посредством интерфейсов V2I (vehicle-to-infrastructure) или же друг с другом посредством интерфейсов V2V (vehicle-to-vehicle) [1]. Таким образом, беспилотное ТС может не только оценивать динамические характеристики других ТС посредством встроенной системы датчиков, но и обмениваться с ними информацией об их намерениях. Эти интерфейсы позволяют группе беспилотных ТС создавать синхронизированные кластеры (плато) из нескольких ТС, движущиеся с одинаковой скоростью как единое целое.

Несмотря на активные исследования и разработки в области беспилотных ТС, очевидно, что гетерогенный трафик, в котором присутствуют как беспилотные автомобили, так и управляемые человеком, будет еще долго присутствовать в транспортных системах всего мира. При этом, хотя о трафике управляемых человеком ТС имеется достаточно эмпирической информации, сведения о трафике беспилотных ТС могут быть получены пока только на основе моделирования, которое в данном случае выступает основным средством исследования [2–5].

Все модели транспортных потоков можно условно разделить на модели макро-, мезо- и микроуровня [6–8]. В моделях макроуровня трафик уподоблен движению сплошной среды, поэтому преимущественно они подходят для описания движения гомогенных систем. Модели микроуровня описывают на кинематическом уровне движения отдельных ТС, поэтому хорошо подходят для описания гетерогенного трафика. Модели мезоуровня занимают промежуточное положение между моделями макро- и микроуровня и в основном базируются на кинетических уравнениях.

Модели микроуровня делятся на модели следования за лидером и модели на основе клеточных автоматов, которые в последнее время и получили основное развитие. Это связано как с простотой самих моделей, так и с их высокой вычислительной производительностью, обусловленной естественной параллелизацией. В то же время модели на основе клеточных автоматов позволяют получить реалистичную картину движения транспорта. За последние 30 лет было предложено большое количество моделей транспортных потоков на основе клеточных автоматов. Преимущественно они развиваются в сторону усложнения: модели микроуровня становятся все более точными, однако отдаляются от изначальной философии подхода клеточных автоматов, подразумевающего простоту и даже некоторую схематичность модели микроуровня, которая позволяет получить относительно реалистичные характеристики системы на макроуровне. Например, в работе [9] была предложена модель клеточного автомата для гетерогенного трафика из управляемых человеком ТС и беспилотных ТС. Однако, для обеспечения правильной временной дискретизации, в этой модели одно ТС занимало 500 клеток. Такой подход уже имеет мало общего с клеточными автоматами, а скорее представляет собой конечно-разностную дискретизацию непрерывного процесса с высоким разрешением.

Интересно отметить, что параллельно с интенсивным развитием моделей типа Нагеля-Шрекенберга [10, 11] были предложены модели довольно сложных транспортных систем (например, модель транспортной системы города Женева [12]) на основе простейшего правила эволюции клеточных автоматов – правила № 184 Вольфрама [13].

Целью настоящей работы является разработка простой модели гетерогенного транспортного потока на основе клеточных автоматов, которая позволяет качественно воспроизводить основные характеристики транспортного потока и оценивать влияние соотношения транспортных средств различного типа на пропускную способность и другие макроскопические характеристики.

### 1. Модель движения транспортных средств

В классических моделях клеточных автоматов транспортная сеть представляется следующим образом. Дорожное полотно разбивается на конечное множество клеток. В каждой клетке возможно нахождение только одного ТС. Таким образом, состояние клетки может быть описано одним битом – либо клетка занята ТС, либо свободна. За основу предлагаемой модели взято простейшее правило временной эволюции – правило Вольфрама № 184, которое состоит в следующем. Если следующая в направлении движения ТС клетка не занята другим ТС, то текущее ТС перемещается на одну клетку вперед; в противном случае оно остается в той же клетке (рис. 1).

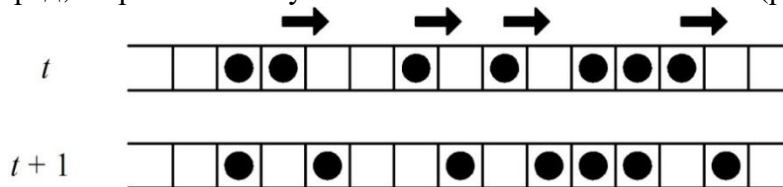


Рис. 1. Правило Вольфрама №184

(стрелками показаны ТС, которые перемещаются при переходе от шага  $t$  к шагу  $t + 1$ )

Таким образом, если обозначить текущее положение (номер ячейки)  $i$ -го ТС как  $x_i$ , а расстояние до следующего ТС (число пустых клеток между  $i$ -м ТС ( $i + 1$ )-м ТС) как  $g_i$ , описанное правило можно записать следующим образом:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t) + 1, & \text{if } g_i(t) > 0, \\ x_i(t), & \text{if } g_i(t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

В результате применения этого правила может быть построена фундаментальная диаграмма (зависимость нормализованного потока ТС от нормализованной плотности ТС, см. далее), которая имеет симметричную треугольную форму. Хотя такая диаграмма является верной с качественной точки зрения, следует отметить ее чрезмерную схематичность – данные реальных наблюдений показывают гораздо сложное поведение этой кривой.

Для того чтобы сделать модель движения управляемых человеком ТС более реалистичной, введем в нее элементы стохастичности. В этом случае шаг (1) станет выполняться с некоторой вероятностью  $P$ , которая будет зависеть от  $g_i$ :

$$P = \begin{cases} p_1, & \text{if } g_i(t) = 1, \\ p_2, & \text{if } g_i(t) = 2, \\ p_3, & \text{if } g_i(t) > 2, \end{cases} \quad (2)$$

причем  $p_1 < p_2 < p_3$ . Таким образом, вероятность случайного торможения ТС тем больше, чем меньше расстояние до следующего ТС в направлении его движения. Для сравнения на рис. 2 показаны типовые пространственно-временные диаграммы ( $x-t$  диаграммы) для классического правила № 184 (1) и предложенного правила (2).

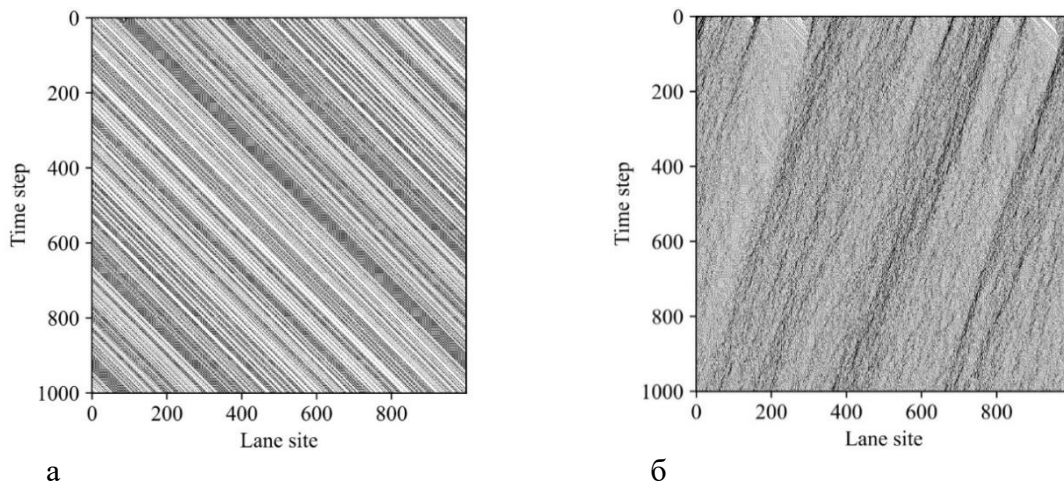


Рис. 2. Типовые пространственно-временные диаграммы:  
а – для правила (1), б – для правила (2)

В отличие от классической модели Нагеля-Шрекенберга, которая при значении максимальной скорости равной 1 и вероятности случайного торможения, равной нулю, сводится к классической модели Вольфрама, предложенная модель учитывает эффект медленного старта.

Реакция на изменение движения предыдущего ТС определяется типами текущего и впереди движущегося ТС. В рассматриваемой гетерогенной системе может быть четыре типа следования (рис. 3):

- 1) управляемое человеком ТС – управляемое человеком ТС;
- 2) управляемое человеком ТС – автоматическое (беспилотное) ТС;
- 3) автоматическое (беспилотное) ТС – управляемое человеком ТС;
- 4) автоматическое (беспилотное) ТС – автоматическое (беспилотное) ТС.

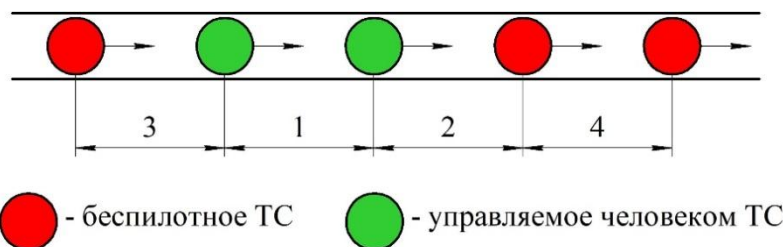


Рис. 3. Типы следования ТС в гетерогенной транспортной системе

Будем считать, что движение управляемого человеком ТС не зависит от того, как управляется ТС, находящееся перед ним, поскольку время реакции на действия впереди движущегося ТС будет одинаковым. Поэтому в случаях 1 и 2 модель движения текущего ТС будет одной и той же, и будет описываться правилом (2).

В случае 3 время реакции беспилотного ТС определяется временем реакции системы автоматического круиз-контроля, а в случае 4 – системой связи между двумя беспилотными ТС. Предполагается, что для беспилотных ТС отсутствуют стохастические эффекты торможения, которые присущи человеку, поэтому отличие случая 3 от случаев 1 и 2 состоит в том, что в нем отсутствует случайное торможение, и движение описывается классическим правилом № 184 (1).

Основное отличие случая 4 состоит в том, что группа из последовательно движущихся ТС может образовывать кластер из нескольких ТС, который движется как единое целое за счет обмена информацией между беспилотными ТС через интерфейс V2V. Поэтому, для того чтобы описать движение в случае 4, нужно использовать другое правило. Во-первых, в случае, если впереди беспилотного ТС имеется свободная

клетка, то оно в нее перемещается. Во-вторых, если клетка впереди занята другим беспилотным ТС, то осуществляется проверка того, что перед этим ТС имеется свободная клетка, либо другое беспилотное ТС. Если имеется непрерывный набор последовательно расположенных клеток длиной не более  $S$  (здесь  $S$  – максимально допустимый размер кластера из беспилотных ТС) впереди которого имеется свободная клетка, то все эти ТС смещаются на одну клетку как единое целое (рис. 4).

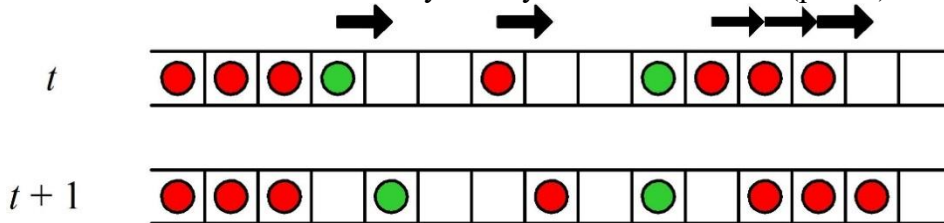


Рис. 4. Модель движения кластера из беспилотных ТС

На рис. 4 также показаны другие варианты совместного движения ТС.

## 2. Имитационная модель транспортного потока

Будем рассматривать классическую топологическую структуру транспортной сети – однополосную дорогу с периодическими граничными условиями, которая эквивалентна замкнутой кольцевой дороге. В системе может присутствовать два типа агентов – управляемые человеком ТС и беспилотные ТС.

Систему в целом можно охарактеризовать набором макропараметров: нормализованной плотностью ТС  $\rho$  и нормализованным потоком  $q$  (пропускной способностью). С учетом замкнутости системы полное число ТС в ней сохраняется, поэтому плотность ТС может быть вычислена следующим образом:

$$\rho = \frac{N}{n_L}, \tag{3}$$

где  $N$  – полное число ТС в системе;  $n_L$  – полное число ячеек.

Средний нормализованный поток определяется по формуле

$$q = \frac{1}{T_p} \frac{\sum_{t=0}^{T_p-1} \sum_{i=0}^{n_L-1} v_i(t)}{n_L}, \tag{4}$$

где  $T_p$  – число шагов по времени, в течение которых производится снятие показаний;  $v_i(t)$  – скорость ТС на шаге  $t$  (ее значения могут быть 0 или 1, поэтому эту величину можно интерпретировать как логический флаг того, что ТС двигалось на текущем шаге по времени), которая может быть вычислена по формуле

$$v_i(t) = x_i(t) - x_i(t-1), \tag{5}$$

В начальный момент симуляции заданное число ТС (в соответствии с заданной плотностью ТС и долей в общем числе ТС управляемых человеком) распределены случайным образом в системе. Скорость всех ТС в начальный момент равна нулю. Затем система эволюционирует в течение  $T_{rup} = 5000$  шагов для достижения стационарного состояния. После этого в течение  $T_{op} = 4000$  шагов по времени продолжается период наблюдения, в течение которого снимаются значения нормализованного потока (4). Таким образом, суммарное число шагов по времени для однократной симуляции системы составляет 9000 шагов. Полное число пространственных ячеек  $n_L = 1000$ .

В расчетах были приняты следующие значения вероятностных параметров модели:  $p_1 = 0.3$ ;  $p_2 = 0.7$ ;  $p_3 = 0.99$ .

Программный код написан на языке Python с использованием Cython для основных вычислительных модулей. Для ускорения вычислений использовалось распараллеливание на процессорах.

### 3. Результаты моделирования

На рис. 5 показаны фундаментальные диаграммы (зависимости нормализованного потока от плотности ТС) для различных долей управляемых человеком ТС в системе. При этом максимально возможный размер кластера из беспилотных ТС в данном случае был установлен равным 8.

На этих диаграммах прослеживается известная тенденция, согласно которой увеличение доли связанных беспилотных ТС может повысить пропускную способность в 4–5 раз [9]. При этом виден существенный разрыв для случаев, когда доля управляемых человеком ТС в системе равна 25% и 0% - поток отличается практически в 2 раза.

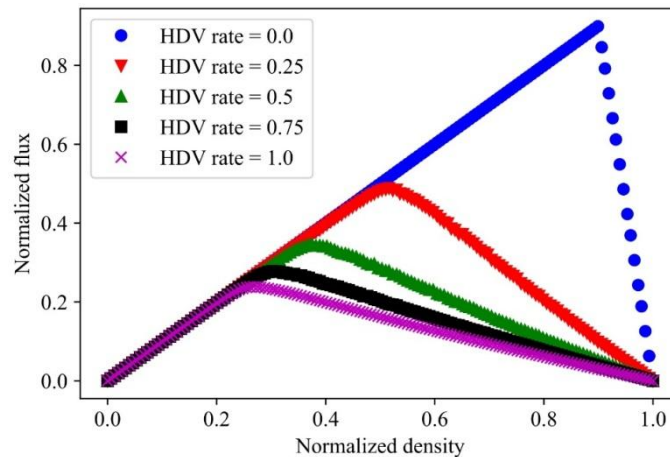


Рис. 5. Фундаментальная диаграмма при различных долях управляемых человеком ТС в системе (HDV rate)

На рис. 6 показаны соответствующие этим же случаям распределения средних скоростей в зависимости от плотности ТС. Видно, что снижение средней скорости начинается при все больших значениях плотностей ТС вместе с увеличением доли беспилотных ТС в системе.

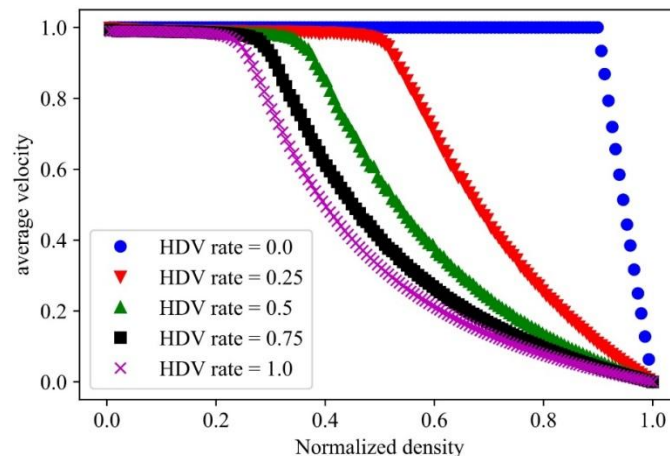


Рис. 6. Зависимость средней скорости ТС от их нормализованной плотности при различных долях управляемых человеком ТС в системе (HDV rate)

На рис. 7 и 8 показаны фундаментальные диаграммы и значения средних скоростей ТС в системе для случая, когда в системе все ТС беспилотные (HDV rate = 0), а варьируется максимально допустимая величина размера кластера, который могут образовывать беспилотные ТС.

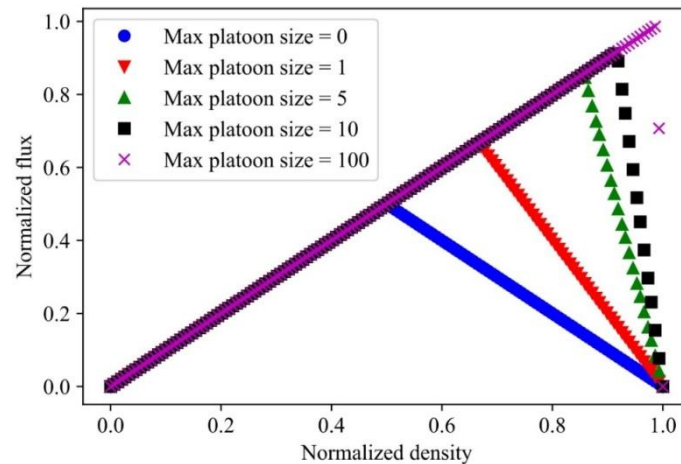


Рис. 7. Фундаментальные диаграммы в системе беспилотных ТС при различных значениях максимально допустимого размера кластера беспилотных ТС (Max platoon size)

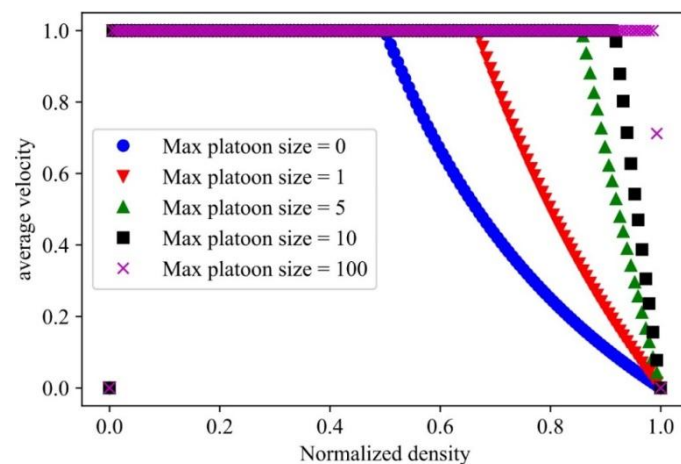


Рис. 8. Средние скорости ТС в системе беспилотных ТС при различных значениях максимально допустимого размера кластера беспилотных ТС (Max platoon size)

Величина размера кластера равная нулю соответствует случаю правила Вольфрама № 184. По мере увеличения размера кластера, пропускная способность растет линейно – в пределе, при бесконечном размере кластера (или, точнее, размере кластера, равном  $n_L - 1$ ), пропускная способность будет максимальной до тех пор, пока в системе присутствует хотя бы одна свободная клетка.

### Выводы

Предложенный подход к описанию гетерогенных транспортных потоков, содержащих управляемые человеком ТС и беспилотные ТС позволяет исследовать влияние доли беспилотных ТС в общем транспортном потоке на пропускную способность и среднюю скорость ТС. С учетом идеализации движения кластера беспилотных автомобилей, получен оптимистичный результат, согласно которому рост пропускной способности практически не ограничен при увеличении доли беспилотных ТС. Такой результат, однако, совпадает с результатами более сложного моделирования [9].

Основным достоинством предложенного подхода является простота микроскопической модели движения ТС. В то же время это является и недостатком: как и многие классические модели, эта модель корректно описывает только две основные фазы транспортного потока – свободное движение и затрудненное движение, в то

время как фаза синхронизированного потока этой моделью не описывается. Поскольку классический подход клеточных автоматов, как и любое моделирование, должен отражать только существенные с точки зрения решаемой задачи стороны изучаемого явления, в данном случае это допустимо. Поскольку с точки зрения вычисления макропараметров и влияния присутствия беспилотных ТС на поток наличие синхронизированной фазы в потоке управляемых человеком ТС можно считать не существенной деталью.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-06090 мк.*

### Литература

1. **Meneghette R.I., De Grande R.E., Loureiro A.A.F.** Intelligent Transport System in Smart Cities. Cham: Springer International Publishing, 2018. 191 p.
2. **Rodaro E., Yeldan Ö.** A multi-lane traffic simulation model via continuous cellular automata. 2013. arXiv:1302.0488.
3. **Vranken T., Sliwa B., Wietfeld C., Schreckenberg M.** Adapting a cellular automata model to describe heterogeneous traffic with human-driven, automated, and communicating automated vehicles // *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 2021. Vol. 570. 125792.
4. **Imran W., Khan Z.H., Aaron Gulliver T., Khattak K.S., Nasir H.** A macroscopic traffic model for heterogeneous flow // *Chinese J. Phys. European Transport Research Review*, 2020. Vol. 63. P. 419-435.
5. **Ye L., Yamamoto T.** Modeling connected and autonomous vehicles in heterogeneous traffic flow // *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 2018. Vol. 490, № 2018. P. 269-277.
6. **Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А., Холодов Я.А., Шамрай Н.Б.** Введение в математическое моделирование транспортных потоков / под ред. А.В. Гасникова. М.: Изд-во МЦНМО, 2013. 429 с.
7. **Treiber M., Kesting A.** Traffic Flow Dynamics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 503 p.
8. **Ni D.** Traffic Flow Theory. Elsevier, 2016. 396 p.
9. **Jiang Y., Wang S., Yao Z., Zhao B., Wang Y.** A cellular automata model for mixed traffic flow considering the driving behavior of connected automated vehicle platoons // *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 2021. Vol. 582. P. 126262.
10. **Nagel K., Schreckenberg M.** A cellular automaton model for freeway traffic // *J. Phys. I*. 1992. Vol. 2, № 12. P. 2221-2229.
11. **Schreckenberg M., Schadschneider A., Nagel K., Ito N.** Discrete stochastic models for traffic flow // *Phys. Rev. E*. 1995. Vol. 51, № 4. P. 2939-2949.
12. **Dupuis A., Chopard B.** Cellular automata simulations of traffic: A model for the city of Geneva // *Networks Spat. Econ.* 2003. Vol. 3, № 1. P. 9–21.
13. **Chopard B., Luthi P.O., Quelois P.A.** Cellular automata model of car traffic in a two-dimensional street network // *J. Phys. A. Math. Gen.* 1996. Vol. 29, № 10. P. 2325-2336.