

УДК 004.942

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТНОГО ДВИЖЕНИЯ

*Флис К.И., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии»*

*Научный руководитель: Тассов К. Л., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
irudakov@bmstu.ru*

ВВЕДЕНИЕ

Качество жизни населения в больших городах сильно зависит от напряжённости на дорогах. Ежедневные пробки уже являются серьёзной проблемой, но с каждым годом объёмы перевозок продолжают увеличиваться. Рост количества личных автомобилей опережает рост увеличения ёмкости дорожной сети: гораздо проще покупать новые машины, чем строить новые шоссе в глухо застроенных мегаполисах. Это ведёт не только к растущим объёмам выбросов в атмосферу углекислого газа, тяжёлых металлов и прочих загрязняющих веществ: миллионы человек вынуждены ежедневно тратить немалое количество личного времени в заторах по пути домой или на работу. Причём это проблема не только водителей, но и пользователей любого наземного общественного транспорта.

Существует множество возможных путей для решения транспортной проблемы. Наиболее эффективный способ – повысить связность дорожной сети с помощью постройки новых магистралей, что позволит перенаправить автомобильные потоки в обход перегруженных областей и предоставить водителям больший выбор маршрутов. Следующее очевидное решение – нарастить пропускную способность существующих дорог с помощью дополнительных полос. Это возможно только при условии, что градостроители предусмотрели резервные площади для подобных реконструкций, иначе расширять шоссе будет просто некуда. Выделение полос для автомобилей с пассажирами (high occupancy vehicle (HOV) lines), а также полос для общественного транспорта, приносит значительные результаты только при условии ощутимого и неотвратимого наказания для нарушителей, а в ряде случаев может ещё сильнее снизить среднюю скорость движения. Четвёртый вариант – ограничение въезда в наиболее загруженные области; впервые подобная мера была применена в Риме в I веке н.э., где из-за

невиданного количества конного транспорта власти были вынуждены разрешить въезд в центр города только муниципальных транспортных средств.

Какая бы ни была выбрана стратегия, оценить её эффективность до практической реализации очень непросто – тем временем, многие меры требуют непростых манипуляций, серьёзных материальных затрат и значительного количества времени. Просчёты могут не только не привести к ожидаемым результатам, но и вызвать транспортный коллапс в таких мегаполисах, как Москва, Нью-Йорк и Токио – поэтому проблема моделирования автомобильных потоков играет важную роль в городском планировании.

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Учёные пытались описать и формализовать процессы, лежащие в основе феноменов транспортного потока, более полувека. В 1950х сэр Джеймс Лайтхилл, эксперт в гидродинамике, заметил, что поток автомобилей на дороге имеет много общего с потоком жидкости в трубе. Первая известная компьютерная транспортная модель (Lighthill-Whitham-Richards model) полностью описывает абстракцию дорожного потока с помощью дифференциальных уравнений. Это была первая *макроскопическая транспортная модель*.

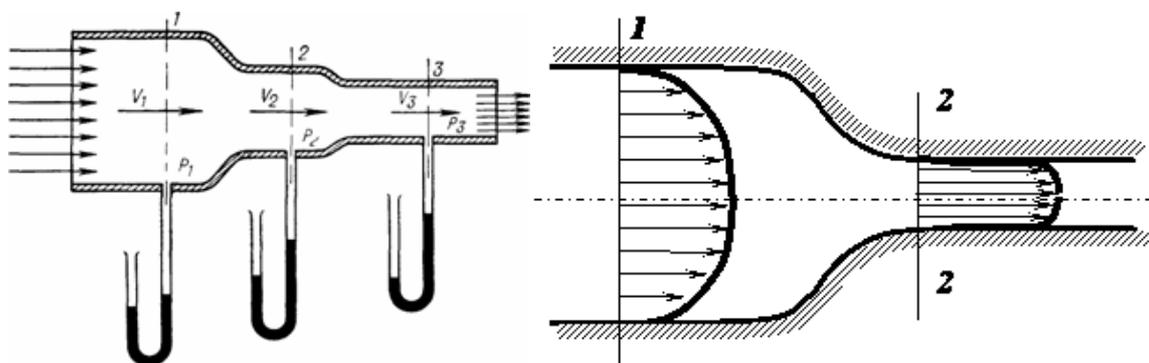


Рис.1. Иллюстрации принципов гидродинамики

На тот момент использование готового математического аппарата, который уже применялся для вычислений на ЭВМ, для решения проблемы из совершенно иной области было интересным решением. Макромодели не рассматривают индивидуальные транспортные средства, которые в данных условиях являются не более чем молекулами жидкости; такие модели способны лишь имитировать общие свойства автомобильного потока. Несмотря на этот факт, модели данного класса способны имитировать несколько

характерных для автомобильного потока процессов, начиная с изменения скорости в сужениях и расширениях дороги, заканчивая «старт-стоп движением» в пробках (которое может быть хорошо описано как ударные волны). Благодаря макроскопическим транспортным моделям было получено множество сведений о реальном автомобильном движении, что говорит о их исторической важности для данной темы.

Простота, ограничения и допущения, лежащие в основе моделей данного класса, объясняют их врождённые недостатки. Макромоделям не хватает детализации и они не могут генерировать надёжных результатов для дорожных сетей с очень ограниченной ёмкостью, к коим относятся дороги больших городов. Вождение автомобиля не ограничивается ускорением и торможением – небольшим количеством таких параметров, как «скорость потока» и «плотность потока» невозможно описать разнообразие возникающих на дорогах ситуаций.

МИКРОСКОПИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Вычислительные мощности современных ЭВМ продолжают расти в соответствии с законом Мура, языки программирования и инструменты разработчиков не отстают в эволюционной гонке. Благодаря прогрессу в сфере вычислительных технологий стало возможным создание транспортных моделей другого типа – *микроскопических*. Логично имитировать не поведение всего автомобильного потока, а движение отдельных машин; не так сложно эмулировать одно, два, или даже десяток транспортных средств с точки зрения производительности, но не сотни – это лишь одна из многих причин того, что исследователи пятидесятих годов XX века вынуждены были работать с абстракциями потоков.

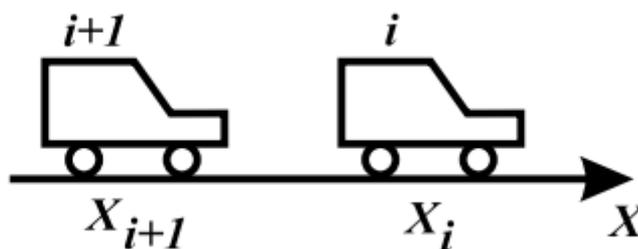


Рис. 2. Концепция модели следования за лидером

Наиболее простой класс микроскопических моделей – так называемые модели «следования за лидером». Дорожная сеть представлена дорожным графом, полосы которого могут иметь установленный предел разрешённой скорости. Каждый автомобиль представлен индивидуальным объектом с небольшим набором изменяемых параметров

(скорость, ускорение) и неизменяемых свойств (длина, максимальная скорость и т.д.). Если в модели предусмотрены перекрёстки – должна быть предусмотрена и простая модель управления светофорами. Главная идея состоит в том, что на поведение автомобиля оказывает влияние только транспортное средство впереди него: автомобиль во главе колонны держит максимальную скорость, тогда как следующие за ним вынуждены подстраиваться под скорость лидера. Следующее уравнение может быть использовано для вычисления позиции и параметров каждого автомобиля по отношению к лидеру колонны:

$$\dot{x}_n(t + \tau) = \lambda(x'_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)),$$

где t – модельное время, τ – время реакции водителя, а x_n – положение n -ной машины. Так называемый коэффициент чувствительности λ может зависеть от различных параметров, включая дистанцию между автомобилями и скорость n -ной машины. Если обратиться к работе МакКлюера “Industrial Mathematics”, можно утверждать, что при $\lambda\tau \leq \pi$ поток является стабильным, а при $\lambda\tau > \pi$ – нестабильным.

Существуют различные вариации этого метода, например модель «оптимальной скорости». В ней предложено такое поведение автомобиля: пока дистанция до следующего автомобиля превышает некоторый порог, он поддерживает максимальную скорость; когда этот порог пройден, автомобиль замедлится и попытается подстроить свою скорость под впередиидущий автомобиль. Видерман пошёл дальше и предложил ввести четыре состояния, в которых может находиться автомобиль:

- 1) Свободное движение – наиболее вероятное состояние лидеров колонн (если таковые имеются), в данном состоянии остальные участники движения не влияют на автомобиль;
- 2) Приближение – адаптация скорости машины во время приближения к впередиидущей;
- 3) Следование – водитель следует за впередиидущей машиной и пытается поддерживать оптимальные скорость и дистанцию;
- 4) Торможение – быстрое замедление, когда впередиидущий транспорт резко снижает скорость по какой-либо причине.

Недостатком моделей данного типа в чистом виде является отсутствие встроенных механизмов, поддерживающих использование многополосных дорог. Несмотря на это, существует огромное количество реализаций моделей данного типа, позволивших исследователям поставить множество экспериментов над дискретным транспортным потоком. Эти модели впервые позволили правдоподобно симитировать контролируемые

перекрёстки и автомобильные очереди, а также пролили свет на феномен «фантомных пробок».

КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ

Дороги в реальном мире могут состоять из более чем одной полосы в одном направлении. На данный момент наиболее популярным методом микроскопического моделирования транспорта является использование *клеточных автоматов*, которые позволяют симитировать многополосные магистрали. Главная идея состоит в том, чтобы представлять дороги в виде численных матриц – каждая строка соответствует полосе, каждая ячейка соответствует участку дороги установленной длины, чаще всего около семи метров. Некоторые числа в матрице означают автомобили, передвигающиеся с соответствующей скоростью, с помощью других могут быть закодированы пустые участки дорог, аварии и другие препятствия.

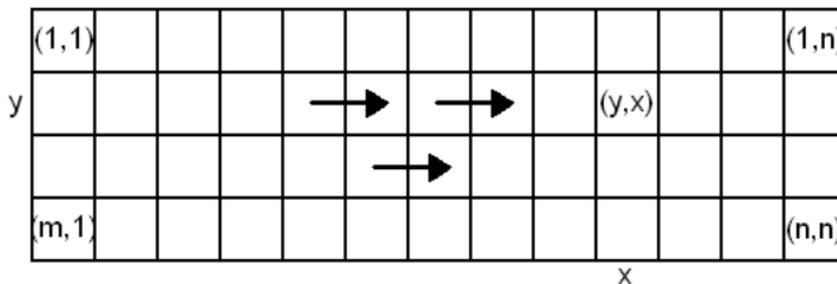


Рис. 3. Участок дороги в представлении метода конечных автоматов

Протяжка модели производится шаг за шагом путём применения некоторого набора правил к каждой ячейке, как «переместиться на n ячеек вперёд», если впереди нет препятствий и медлительных транспортных средств, или «сменить полосу и переместиться на $n-1$ ячеек вперёд» и т.д. Сильной стороной такого метода является отсутствие дифференциальных вычислений – нет даже необходимости в вещественных числах, только базовые операции над целочисленными значениями. Полностью формализованные модели могут даже иметь набор предрассчитанных действий для набора возможных ситуационных паттернов; в этом случае системе нужно лишь подобрать подходящее правило для участка матрицы вокруг «автомобиля» и перезаписать его «ответом» из библиотеки действий для получения позиции машины на следующем шаге.

Нагель и Шрекенберг описали первую реализацию транспортной модели на клеточных автоматах в 1992 году; она была очень проста и симулировала только одну полосу. С тех пор методы, базирующиеся на клеточных автоматах, были признаны наиболее адекватными и эффективными для моделирования транспортных потоков,

большинство разрабатываемых на данный момент моделей основаны на этом подходе. Они уже сейчас используются для анализа эффективности перекрёстков и затруднённого дорожного движения, но существует проблема – в подобных модели не предусмотрена возможность назначения отдельным автомобилям индивидуальных целей, а это очень важно для изучения дорожного потока в масштабах города.

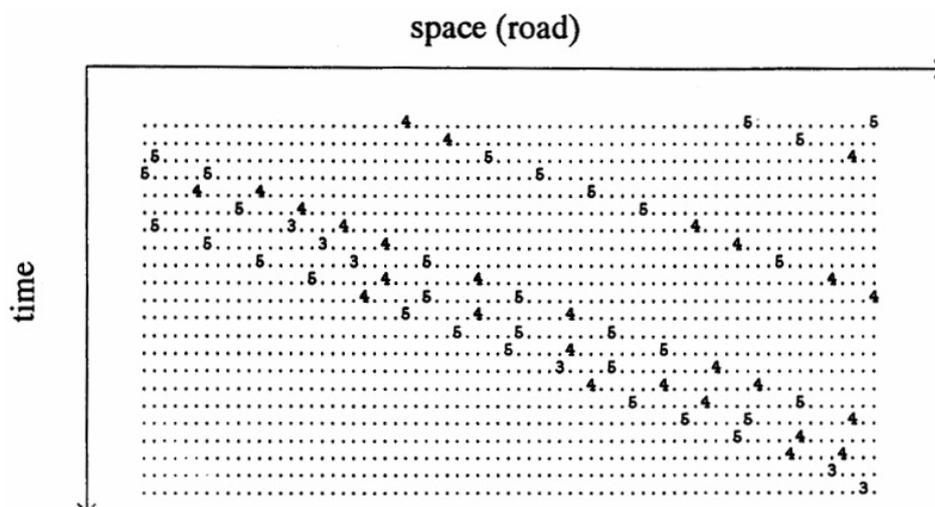


Рис. 4. Пространственно-временная диаграмма модели на клеточных автоматах Нагеля-Шрекенберга

Существуют дополнительные недостатки, к примеру – невозможно содержать достаточно много информации об одном автомобиле в одной клетке матрицы, вследствие чего все автомобили в модели обладают одинаковыми физическими и поведенческими свойствами. Настолько ограниченное окружение не позволяет симулировать индивидуальность каждого транспортного средства, но существует подход, позволяющий обойти это ограничение – *многоагентное моделирование*.

МНОГОАГЕНТНЫЕ МОДЕЛИ

В агентно-ориентированных транспортных моделях главным объектом является водитель (который, в большинстве случаев, может быть совмещён со своим транспортным средством в единую сущность). Каждый водитель вместе с автомобилем может обладать широким набором индивидуальных параметров: динамические характеристики автомобиля, оказываемое воздействие на окружающую среду, информация о привычках водителя и даже его текущее настроение – что позволит учитывать психологические особенности различных культур (которые действительно влияют на транспортное движение судя по последним исследованиям). Весь набор параметров каждого водителя используется на каждом шаге модели вкуче с доступной информацией об окружающем

Молодежный научно-технический вестник ФС77-51038

мире – таким образом можно достичь беспрецедентного уровня детализации. Недостатком данного метода является наибольшая сложность модели среди всех рассмотренных, а также высокие требования к вычислительным системам – но на сегодняшний день это является приемлемой ценой.

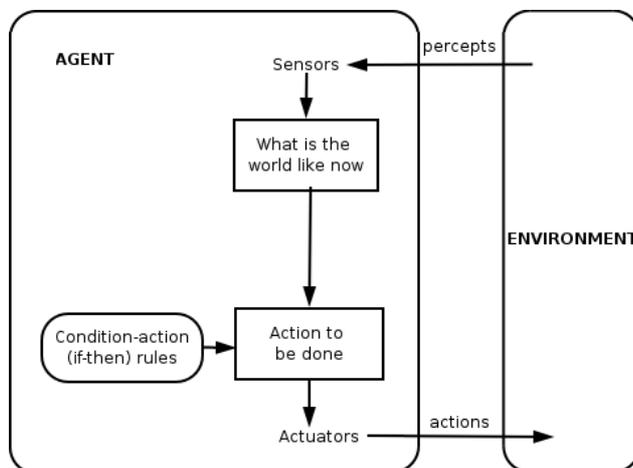


Рис. 5. Концепция агента

Одной из наиболее интересных особенностей многоагентных систем является взаимодействие между агентами. Каждый агент с точки зрения остальных агентов является «чёрным ящиком» с неизвестными параметрами и непредсказуемыми намерениями. Агенты вынуждены действовать в соответствии с текущим окружением (информация о котором может быть неполной: водитель может не видеть сквозь здания и не знать точного коэффициента сопротивления асфальта), принимая во внимание сигналы от других агентов и доступные невооружённому взгляду параметры (каждый водитель должен каким-то образом оценивать скорость окружающих транспортных средств). Каждый агент «думает» за себя как настоящий водитель, его действия не определяются кем-то извне – внутренняя и внешняя по отношению к агенту информация обрабатывается с помощью *экспертной системы*, которая выдаёт вывод о действии, которое будет выполнено водителем на следующем шаге. Экспертная система содержит базу знаний, формируемую разработчиком модели во время анализа реального опыта вождения людей; эта информация может быть получена с помощью опросов, бесед с водителями или даже с помощью сбора телеметрии с транспортных средств.

Направлением моей магистерской диссертации является «Создание и анализ модели транспортных потоков», поэтому я провёл данный обзор существующих методов моделирования. Было решено создать многоагентную имитационную модель, которая будет лишь отдалённо напоминать модель на клеточных автоматах.

Моя идея состоит в том, чтобы использовать матрицы для дискретизации дорог – подобная мера должна уменьшить общее количество вычислений по сравнению с континуальными моделями, но не обязывает хранить информацию об автомобилях внутри ячеек. Элементы дорожных матриц будут хранить только идентификационные номера автомобилей и различных дорожных объектов, что позволит эмулировать огромное количество транспортных средств; обрабатывать их параметры и определять их действия на каждом шаге будет единая экспертная система. Подобный подход хорошо ложится на объектно-ориентированную парадигму программирования и даёт возможность вносить почти любые изменения в модель автомобиля. Станет возможным имитировать не только обычные автомобили, но и наземные транспортные средства всех возможных видов, включая автобусы, троллейбусы, трамваи, поезда, грузовики, автопоезда и даже велосипеды.

Планируется выделить два отдельных слоя «мышления» агентов: *стратегический* и *тактический*. Первый будет обрабатывать основные цели агента, например отвечать за выбор пути к пункту назначения. Тактический слой будет ответственен за принятие ситуационных решений, которые будут направлены на избежание опасных ситуаций – следует ли перестраиваться, какой скоростной режим уместен в данный момент и т.д. Экспертная система водителя не будет обладать исчерпывающей базой знаний – данная работа не предполагает идеальное соответствие модели с реальным миром, которое является практически недостижимым ввиду обилия влияющих на транспортный поток случайных факторов; её должно быть достаточно для имитации наиболее значимых аспектов процесса вождения. Поведенческие паттерны человека тоже невозможно полностью формализовать, поэтому использование эвристик является неотъемлемой частью разрабатываемой модели. Но, так или иначе, нет причин полагать, что вышеперечисленные аппроксимации не позволят создать достаточно адекватную реальности модель транспортного движения.

На данный момент я работаю над концепцией модели и её программной базой, будущие статьи будут посвящены конкретно разрабатываемой модели, деталям разработки и анализу результатов.

Список литературы

1. Lighthill, M.J. A theory of traffic on long crowded roads / M.J. Lighthill, G.B. Whitham. — 1955. — Vol. 229. — Pp. 317–345.
2. И., Швецов В. Математическое моделирование транспортных потоков / Швецов В. И. — 2003.

3. Payne, H. J. Models of freeway traffic and control / H. J. Payne. — 1971. — Pp. 51–56.
4. Kerner, B. S. Deterministic spontaneous appearance of traffic jams in slightly inhomogeneous traffic flow / B. S. Kerner, P. Konhaeuser, M. Schilke // Phys. Rev. — P. 1995.
5. Prigogine, I. A Boltzmann-like approach for traffic flow / I. Prigogine. — 1961.
6. Newell, G. F. Nonlinear effects in the dynamics of car following / G. F. Newell. — 1961.
7. Cremer, M. A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations / M. Cremer, J. Ludwig. — 1986. — Pp. 297–303.
8. Nagel, K. A cellular automaton model for freeway traffic / K. Nagel, M. Schreckenberg // Physique I France. — 1992.
9. А.Н., Котов. Моделирование дорожного движения на многополосной магистрали при помощи двумерного вероятностного клеточного автомата с тремя состояниями / Котов А.Н. — 2008.