



4841041

На правах рукописи

Малыханов Андрей Анатольевич

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ АГЕНТА
ДЛЯ НИЗКОУРОВНЕВОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2011

17 МАР 2011

Работа выполнена на кафедре информационных технологий в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Ульяновский государственный университет.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кумунжиев Константин Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Негода Виктор Николаевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Воденин Дмитрий Ростиславович

Ведущая организация: ФНПЦ ОАО «НПО Марс», г. Ульяновск

Защита диссертации состоится 30 марта 2011 г. в 11³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.278.02 при Ульяновском государственном университете по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного университета, с авторефератом – на сайте вуза <http://www.uni.ulsu.ru>.

Просьба направлять отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу: 432000, г. Ульяновск, ул. Л.Толстого, д. 42, УлГУ, Управление научных исследований.

Автореферат разослан «26» февраля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Волков М.А.

Общая характеристика работы

Актуальность исследования

Возрастающие автотранспортные потоки больших городов диктуют необходимость реконструкции существующих и создания новых транспортных узлов¹. Для оценки эффективности транспортного строительства используются различные методы. Исследование транспортных систем с помощью имитационных моделей получает все более широкое распространение благодаря гибкости и наглядности получаемых результатов.

Подобные исследования могут проводиться в учреждениях муниципального управления и проектных организациях при разработке транспортных систем. Кроме того, имитационные модели транспорта иногда являются частями более крупных моделей бизнес-процессов предприятий. В этом случае задачи транспортного моделирования могут вставать перед компаниями, оказывающими услуги по техническому консалтингу.

В зависимости от масштабов моделируемой системы выбирается и масштаб модели. Высокоуровневые модели рассматривают поток машин как непрерывную величину и оперируют агрегатными характеристиками объектов транспортной инфраструктуры. В свою очередь, низкоуровневые модели отражают поведение каждого участника движения. Для построения таких моделей используется агентный подход.

В современных российских городах затруднения в движении носят локальный характер и происходят по причине десинхронизации светофорного регулирования, отсутствия развязок на загруженных пересечениях и. т. п. Поэтому в настоящий момент наиболее актуально исследование отдельных проблемных участков дорог. Низкоуровневые агентные имитационные модели наиболее адекватно отражают поведение небольших транспортных систем, учитывают их особенности и поэтому представляют наибольший интерес.

В известных работах^{2,3} выделены основные аспекты поведения агентов в низкоуровневых имитационных моделях транспортных систем. Однако проведенные в них исследования и существующие модели не обеспечивают решение некоторых задач.

¹ Zou Zhi-jun, Yang Dong-yuan An Object-oriented Development of Urban Traffic Simulation Laboratory System // Journal of system simulation. Vol. 14, No. 7, 2002. – P. 844–848

² Panwai S., Dia H. Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behavior // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Vol. 6, No. 3, 2005. – P. 112–118

³ Hidas P. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. Vol. 10, Iss. 5-6, 2002. – P. 351-371

1. Исследованные аспекты поведения агентов не включают ситуации непредвиденного возникновения препятствий на пути. Таким образом, существующие системы низкоуровневого моделирования транспорта неспособны адекватно моделировать поведение участников движения при авариях и других нестандартных ситуациях.
2. Кроме того, отсутствует алгоритмически четкое и полное описание модели поведения агента. Многие технологии составляют коммерческую тайну их создателей.
3. Существующие модели участников дорожного движения не предназначены для использования в имитационных моделях произвольной структуры. Средства моделирования, разработанные на их основе, являются узкоспециальными инструментами, сопряжение которых с другими моделями крайне затруднительно.

Таким образом, представляется целесообразной разработка и реализация модели агента-участника движения, которая может быть положена в основу системы поддержки принятия решений, основанной на низкоуровневом имитационном моделировании. Создание такой системы позволит предлагать варианты организации и реорганизации схем дорожного движения, обосновывать целесообразность принимаемых решений и, в результате, снижать затраты при проектировании объектов транспортной инфраструктуры. В частности, модель позволит создать метод оценки эффективности изменения светофорного регулирования на перекрестках, что актуально для улиц крупных городов.

Объектом исследования в данной работе является имитационная модель агента-участника дорожного движения. Предметом исследования являются структура, алгоритмы функционирования и способы программной реализации модели агента-участника движения.

Научная новизна

Все результаты, полученные в диссертационной работе, являются новыми и актуальными. В частности, предложена модель агента-участника дорожного движения, отражающая основные аспекты поведения водителей. Также выполнена программная реализация модели агента, пригодная для низкоуровневого исследования транспортных систем.

Цель и задачи работы

Целью работы является создание средств и методик, обеспечивающих применение агентного имитационного моделирования для исследования схем организации дорожного движения. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- Создана расширяемая имитационная модель агента-участника дорожного движения.
- Предложен метод, позволяющий моделировать поведение участников дорожного движения при возникновении препятствий на их пути.
- Разработан программный комплекс, реализующий модель агента, используемую при низкоуровневом имитационном моделировании транспортных систем.
- Предложена методика исследования и повышения эффективности светофорного регулирования на участках городских автотранспортных систем.

Методы исследования

В диссертационной работе применялись методы системного анализа, имитационного моделирования, теории графов и вычислительной геометрии. При программной реализации модели агента использовались методы структурного и объектно-ориентированного программирования.

Основные положения, выносимые на защиту

- Расширяемая имитационная модель агента, отражающая поведение участника дорожного движения, предназначенная для низкоуровневого исследования транспортных систем.
- Метод построения траектории движения агента-участника движения при возникновении на его пути множества препятствий, учитывающий исходную траекторию движения агента.
- Программный комплекс, реализующий предложенную модель агента на платформе AnyLogic и учитывающий существующие модели аспектов поведения участников дорожного движения.
- Методика, позволяющая исследовать возможность повышения пропускной способности регулируемых перекрестков с применением созданного программного комплекса и оптимизатора OptQuest.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, полученных в данной работе, обеспечивается корректностью применения математического аппарата и строгостью постановки задачи. Достоверность также подтверждается проведенными компьютерными экспериментами и результатами тестирования разработанного программного комплекса.

Практическая и теоретическая значимость

Результаты работы положены в основу системы мелкомасштабного имитационного моделирования транспортных потоков, позволяющей анализировать свойства существующих и проектируемых транспортных узлов. Система реализована в виде программного комплекса, который может быть использован в учреждениях муниципального управления, проектных организациях и консалтинговых компаниях, занимающихся проектированием и реорганизацией схем дорожного движения.

Предложенная модель агента может быть использована в составе более сложных имитационных моделей организационно-технических систем.

Разработанные программные библиотеки могут быть использованы независимо от системы в целом для разработки агентных моделей AnyLogic с пространственными взаимоотношениями агентов. Модуль геометрических вычислений может быть использован при реализации алгоритмов вычислительной геометрии на языке Java.

Апробация работы

Основные результаты исследования были апробированы на конференциях:

- VII Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических систем и процессов», Ульяновск, УлГУ, 2009;
- Interactive Systems and Technologies: the Problems of Human-Computer Interaction, Ульяновск, УлГТУ, 2009;
- Четвертой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2009), Санкт-Петербург, 2009;
- Winter Simulation Conference (Wintersim-2009, Ph. D. Colloquium), Остин, Техас, США, 2009;

- Конференции «Информатика, моделирование, автоматизация проектирования» (ИМАП-2010), Ульяновск, УлГТУ, 2010.

Личный вклад автора

Задача исследования поставлена совместно с научным руководителем. Основные теоретические и практические результаты получены автором самостоятельно. Разработка алгоритмов, программного комплекса анализ и тестирование системы также выполнены автором самостоятельно.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 13 работах, из них 3 – в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка из 100 цитируемых источников и двух приложений. Основной текст диссертации изложен на 104 страницах. Диссертация содержит 35 рисунков, 2 листинга кода и 9 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследования, приводятся его цели и задачи. Показывается научная новизна полученных результатов, а также перспективы их практического применения.

В первой главе даются основные понятия, приводится обзор работ по теме исследования и существующих инструментов низкоуровневого моделирования транспортных систем.

Транспортная система – участок дорожной сети и сопутствующей инфраструктуры с движущимися по ней транспортными средствами – участниками движения. Низкоуровневое исследование транспортной системы предполагает как определение характеристик самой системы (пропускная способность участков, максимальная скорость потока, средняя плотность потока и т.п.), так и вычисление величин, относящихся к участникам движения (количество перестроений, время простоя в пробке, средняя маршрутная

скорость). Существуют два подхода к построению⁴ низкоуровневых моделей транспортных систем.

Моделирование дорожного движения с помощью клеточных автоматов основывается на задании дискретных правил поведения модели, оперирующей с целыми числами. Моделируемый участок дороги разделяется на секции определенного размера – клетки. Каждая клетка может находиться в одном из некоторого конечного числа состояний. Время также дискретизируется на конечные интервалы.

Однако модели на клеточных автоматах обладают рядом существенных ограничений, главным из которых является невозможность отслеживания состояния отдельного участника движения.

Другим подходом к изучению транспортных систем является построение моделей с множеством агентов, движущихся в непрерывном пространстве. Важной особенностью агентных моделей является то, что их поведение – результат взаимодействия агентов, под которыми понимаются программные сущности, моделирующие участников дорожного движения. Ввиду того, что логика поведения агента-участника движения довольно сложна и включает стохастические элементы, можно говорить о невозможности замены агентной модели какой-либо системой расчетных аналитических моделей. Поэтому моделирование автомобильного транспорта с помощью агентного подхода получило широкое распространение.

Так, в настоящее время хорошо исследованы несколько основных аспектов модели агента: алгоритмы следования за впереди идущей машиной (AIMSUN2⁵, MITSIM⁶); алгоритмы выбора места для перестроения (AIMSUN2, MITSIM, VISSIM); алгоритмы выбора предпочтительной полосы движения (VISSIM, HUTSIM⁷). Однако эти исследования не описывают поведение агента-участника движения в комплексе и не решают некоторых задач, важных с точки зрения низкоуровневого исследования транспортных систем.

- Не предлагается обобщенная модель агента-участника движения, охватывающая как планирование маршрута поездки, так и тактическое маневрирование.

⁴ Котов А.Н. Моделирование дорожного движения на многополосной магистрали при помощи двумерного вероятностного клеточного автомата с тремя состояниями // СПб.: СПбГУ ИТМО. 2008.

⁵ LIOS. Projecto Petri. <http://www.cio.ups.ec>

⁶ Yang, G. A. Simulation Laboratory of Dynamic Traffic Management Systems // Massachusetts Institute of Technology. 2001

⁷ Kosonen I. HUTSIM – Simulation Tool for Traffic Signal Control Planning // Helsinki University of Technology. 2001

- Не существует описания алгоритма выбора ускорения, зависящего как от впереди идущего агента, так и от намерений по перестроению.
- Существующие модели участников дорожного движения не предназначены для использования в имитационных моделях произвольной структуры.

На основе результатов аналитического обзора сделан вывод о целесообразности разработки и реализации модели агента-участника движения.

Во второй главе рассматривается предложенная модель агента-участника дорожного движения.

Большой объем разнородной информации и сложность принимаемых водителями решений неизбежно приводят к практической невозможности создания единого алгоритма поведения агента. Представляется целесообразным разделить алгоритмы поведения агента на несколько уровней. Критерий выделения уровней – частота принятия решений, которая, в свою очередь, зависит от скорости изменения состояния среды и других агентов. Предложена трехуровневая модель участника дорожного движения, структура которой показана на рисунке 1.

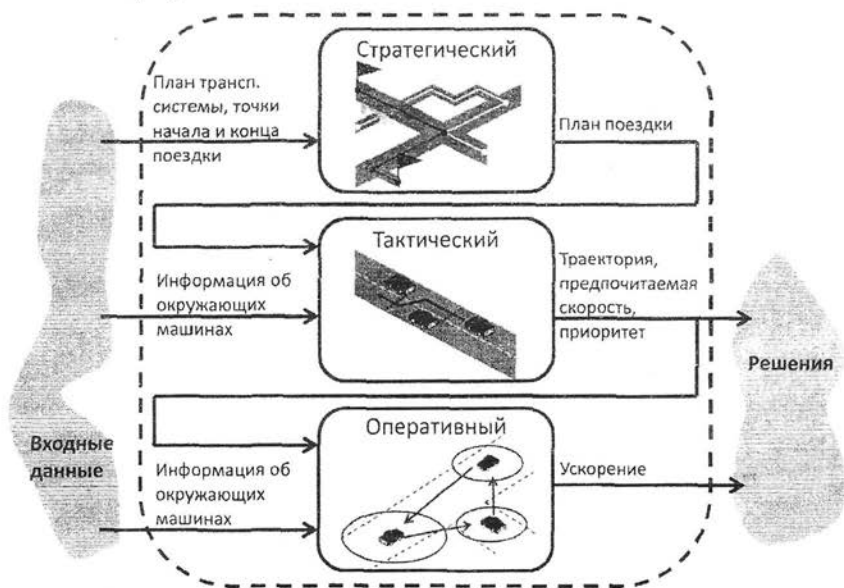
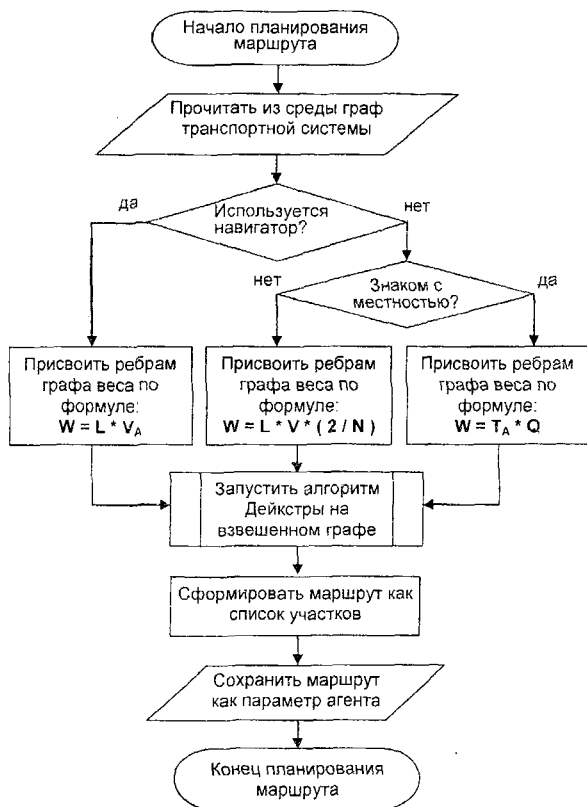


Рисунок 1. Структура модели поведения участника движения

Каждый уровень соответствует моделированию принятия решений различного масштаба – от планирования маршрута до изменения положения акселератора.



W – вес ребра;
 L – длина участка;
 V – разрешенная скорость на участке;
 N – количество полос участка;
 T_A – среднее время проезда участка;
 Q – случайная величина, характеризующая точность знаний водителя;
 V_A – средняя скорость движения по участку в текущий момент.

Рисунок 2. Алгоритм планирования маршрута поездки

Принятие решения на стратегическом уровне заключается в построении маршрута (последовательности дорог, перекрестков и т.д.) из текущего положения агента в место назначения с использованием графа транспортной системы и информации о загруженности ее участков. В вершинах графа транспортной системы находятся точки соединения участков, соответствующие позициям смены модели поведения агента на тактическом уровне. Ребра графа – участки, на которых алгоритм поведения агентов остается постоянным. Граф является частью среды обитания агентов и формируется перед началом

моделирования на основе заданной пользователем структуры транспортной системы. Предложенный алгоритм планирования маршрута поездки показан на рисунке 2.

Тактический уровень отвечает за поведение агента между точками соединения участков. На этом уровне решаются задачи построения алгоритмов выбора предпочтительной полосы движения, перестроения и следования за впереди идущим агентом.

Пусть агенту необходимо проследовать по некоторому участку с несколькими полосами движения. При этом для агента определена предпочтительная скорость, отражающая индивидуальные характеристики моделируемого водителя. На выбор занимаемой полосы движения влияют два основных фактора:

1. возможность двигаться по полосе со скоростью, наиболее близкой к предпочтительной скорости данного агента;
2. возможность при выезде с участка дороги совершить нужный маневр (заданные разрешенные направления движения по полосам).

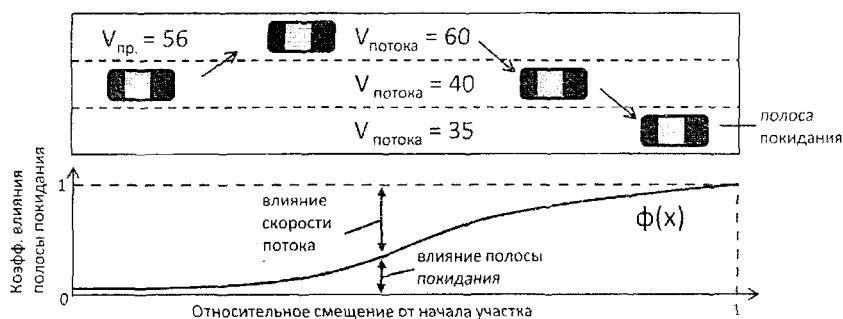


Рисунок 3. Иллюстрация модели выбора участником движения предпочтительной полосы

В начале участка на выбор полосы в большей степени влияет первый фактор, ближе к концу участка – второй. Пронумеруем полосы, начиная от самой правой по ходу движения. Тогда выбор предпочтительной полосы движения может описываться формулой $I = [k(1 - \varphi(x/l)) + n\varphi(x/l)]$, где I – номер предпочтительной полосы, k – индекс полосы, в которой средняя скорость потока в окрестности рассматриваемого агента наиболее близка к его предпочтительной скорости, x – смещение агента относительно начала участка, l – длина участка, n – индекс наиболее свободной полосы, с которой разрешен

выбранный маневр в конце участка, φ – некоторая функция (точный вид функции определяется путем идентификации), удовлетворяющая условиям: $\varphi(0) = 0$, $\varphi(1) = 1$, $\varphi(x)$ не убывает на $[0..1]$. Модель выбора полосы движения проиллюстрирована на рисунке 3.

Алгоритм поведения агента, учитывающий возможные изменения целевой полосы, обобщенно изображен в виде диаграммы состояний на рисунке 4.

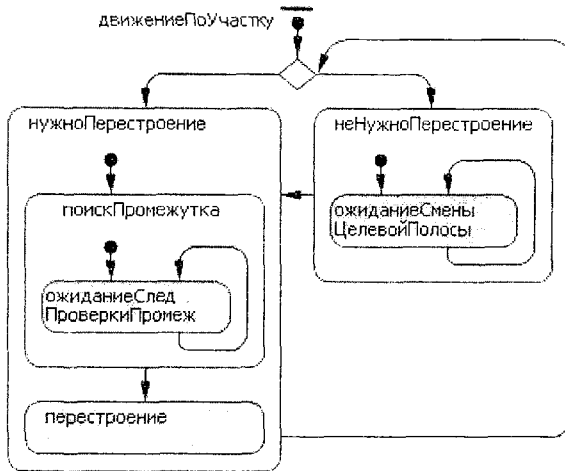


Рисунок 4. Диаграмма состояний при движении агента по многополосному участку дороги

При движении по полосе без перестроения основным решением, принимаемым агентом-участником движения, является выбор ускорения. Основная цель изменения ускорения – поддержание безопасной дистанции до впереди идущего агента при сохранении скорости, наиболее близкой к предпочтительной.

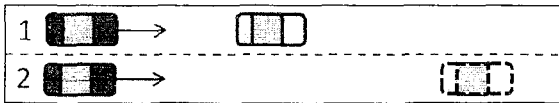


Рисунок 5. Следование за впереди идущим агентом

По результатам изучения существующих моделей выбора ускорения была предложена модель, учитывающая как скорость сближения с впереди идущим агентом, так и расстояние до него. Все ситуации движения без перестроения разделяются на два множества (рисунок 5):

1. случаи, когда впереди идущая машина находится далеко, и
2. случаи, когда машина находится в зоне возможного столкновения.

Агент идентифицирует эти ситуации и вычисляет ускорение на каждом шаге согласно предложенной системе формул (1).

$$\begin{cases} A_0 = A_{\max} F(W(L) - (V - V_0)), & \text{если } W(L) - (V - V_0) > 0 & \text{в ситуации} \\ A_0 = A_{\min} F(W(L) - (V - V_0)), & \text{если } W(L) - (V - V_0) < 0 & \text{типа 1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} A_0 = A_{\max} F(V_{np} - V_0), & \text{если } V_0 < V_{np}, & \text{в ситуации} \\ A_0 = A_{\min} F(V_{np} - V_0), & \text{если } V_0 \geq V_{np}, & \text{типа 2} \end{cases}$$

В системе формул (1): $F(\Delta v)$ – функция зависимости ускорения от разности скоростей, $W(L)$ – функция зависимости безопасной разности скоростей от расстояния до машины, A_0 – ускорение, A_{\max} – максимально возможное ускорение, A_{\min} – максимально возможное замедление, V – скорость впереди идущего агента, V_0 – скорость агента, V_{np} – предпочтительная скорость агента, L – расстояние до агента.

В связи с необходимостью моделировать тактическое маневрирование агентов был разработан метод построения траектории движения при заданных ограничениях.

Пусть имеется двумерное непрерывное пространство, а агент представляет собой прямоугольник заданных размеров, находящийся в исходной точке движения S (рисунок 6). В пространстве определены конечная точка движения агента D и препятствия, представляющие собой замкнутые многоугольники произвольной формы без самопересечений. Конечное (N штук) множество препятствий обозначим $P = \{p_i | i = 1..N\}$. Точки S и D находятся вне любого из препятствий p_i . Необходимо построить ломаную W , начальной точкой которой является точка S , конечной – точка D , удовлетворяющую условию: все точки W должны отстоять от любой из точек препятствий не менее чем на заданное расстояние d . Это условие объясняется спецификой применения алгоритма. Ломаную W назовем искомой траекторией движения агента.

Среди всех точек пространства можно выделить множество точек F , с которыми не может пересекаться искомая траектория W . Построим множество F , основываясь на следующих соображениях:

- любая внутренняя точка любого препятствия p_i принадлежит F ,
- любая точка, отстоящая от любого препятствия p_i менее чем на d , принадлежит F .

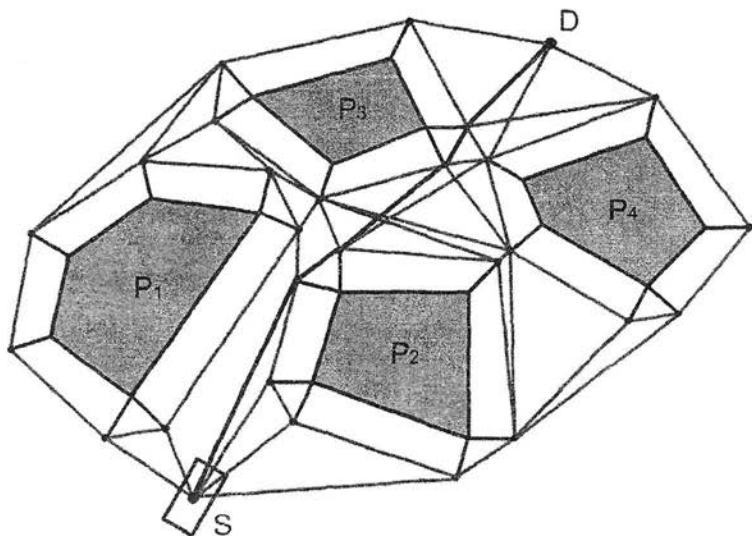


Рисунок 6. Иллюстрация к построению траектории объезда препятствий

Для исключения из алгоритма нахождения траектории W операций с кривыми второго порядка необходимо произвести аппроксимацию криволинейных участков ломаными. Рисунок 7 иллюстрирует необходимые построения, производимые при аппроксимации, для некоторого препятствия p_i .

Для того чтобы надежно приблизить элементы множества F ломаными, необходимо определить два значения:

- Угол α , равный шагу, через который проводятся дополнительные лучи при сглаживании острых углов ломаных
- Расстояние d^* , большее d , от границ множества F , позволяющее найти баланс при аппроксимации границ F между точностью и количеством точек ломаной, а следовательно и вычислительной сложностью применяемых алгоритмов.

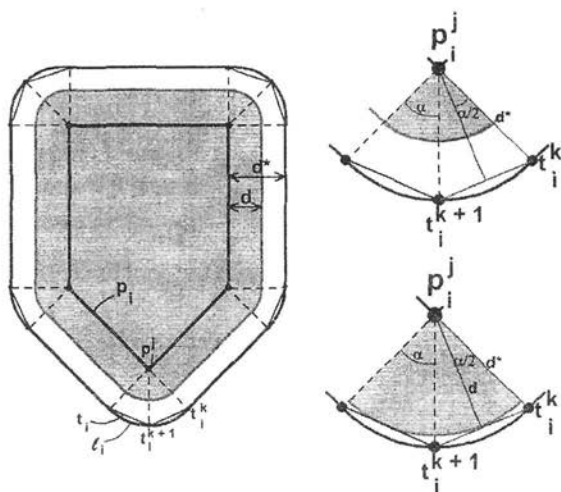


Рисунок 7. Дополнительные построения

Анализ проведенных построений показал, что приемлемый результат достигается при значениях $\alpha = \pi/3$ и $d^* = 2d/\sqrt{3}$.

Определив α и d^* , можно построить ломаную, окружающую препятствие p_i и не приближающуюся к p_i ближе, чем на d . Построенную ломаную t_i , состоящую из точек t_i^k , назовем огибающей для препятствия p_i .

Точки ломаной-препятствия p_i обозначим $\{p_i^1, \dots, p_i^{m_i}\}$. Аналогично, точки огибающей t_i обозначим $\{t_i^1, \dots, t_i^{k_i}\}$. Тогда каждой точке t_i^k будет соответствовать некоторая точка p_i^j .

Сформируем множество C из отрезков вида $[p_i^j, t_i^k]$, причем отрезок добавляем в множество, если расстояние от точки t_i^k до любого из препятствий не меньше d^* . Сформируем множество V из конечных точек t_i^k отрезков множества C . Добавим в множество V точки S и D . Сформируем множество отрезков E следующим образом: для всех пар точек $v_i, v_j \in V$ отрезок $[v_i, v_j]$ включаем в E , если он не пересекается ни с одним из отрезков ломаных-препятствий p_i и не пересекается ни с одним из отрезков множества C .

Представим множества V и E в виде графа $G = (V^*, E^*)$, где каждой точке $v \in V$ соответствует вершина графа $v^* \in V^*$, а каждому отрезку $e \in E$ – ребро графа $e^* \in E^*$. Построенный граф изображен на рисунке 6.

Причем, $(V \cup E) \cap F = \emptyset$, то есть все точки, соответствующие ребрам и вершинам графа не принадлежат F . Значит, ни одна из точек траектории не приближается к препятствиям ближе, чем на d .

Теперь задача нахождения пути W состоит в поиске кратчайшего пути на графе G из вершины, соответствующей точке S , в вершину, соответствующую точке D . Найдем такой путь, применив алгоритм Дейкстры. Результатом работы этого алгоритма может стать последовательность $(S^*, v_{q_1}^*, \dots, v_{q_k}^*, D^*)$, либо сообщение о том, что путь не найден. В случае положительного результата работы алгоритма путь W строится как объединение отрезков, соответствующих ребрам, связывающим последовательно вершины $(S^*, v_{q_1}^*, \dots, v_{q_k}^*, D^*)$.

На оперативном уровне моделируются ситуации приоритетного разъезда, а также избежание столкновений при движении в двухмерном пространстве без ограничений.

Разработанный алгоритм оперативного уровня лежит в основе поведения агентов на перекрестках и сложных транспортных объектах. Агент в модели выбирает ускорение таким образом, чтобы:

- не допустить столкновения с участниками движения, с которыми пересекается траектория;
- двигаться со скоростью, наиболее близкой к предпочтительной.

На протяжении всего времени жизни агент поддерживает в актуальном состоянии два множества ссылок на других агентов модели:

- ссылку на ближайшего агента, находящегося на пути текущего агента, причем его приоритет не принимается в расчет (назовем это множество, состоящее максимум из одного элемента, F);
- множество ссылок на агентов, имеющих более высокий приоритет и пересекающих траекторию текущего агента (обозначим это множество как B).

При формировании этих множеств учитываются только агенты, находящиеся не более чем на заданном расстоянии R от текущего. Это расстояние (радиус круга внимания агента) зависит от скорости текущего агента и увеличивается с ее возрастанием ($R = R_0 + kV$, где R_0 – минимальный радиус круга внимания, k – коэффициент зависимости радиуса круга внимания от скорости, V – скорость агента). Множества F и B обновляются перед каждым принятием решения на тактическом уровне. Принятие агентом решения на каждом шаге моделирования состоит в выборе ускорения A в диапазоне

$[A_{min}, A_{max}]$ – от минимального до максимально возможного ускорения. В зависимости от состояния множеств F и B алгоритм выбора ускорения различается:

- Если $F \cup B = \emptyset$, тогда ускорение A выбирается таким образом, чтобы за заданное время T_A достичь предпочтительной скорости V_p .
- Если $F \cup B \neq \emptyset$, тогда ускорение A выбирается таким образом, чтобы в течение заданного времени T_C не произошло столкновения ни с одним из агентов из $F \cup B$, при условии, что эти агенты продолжают движение с текущим ускорением по заданной траектории.

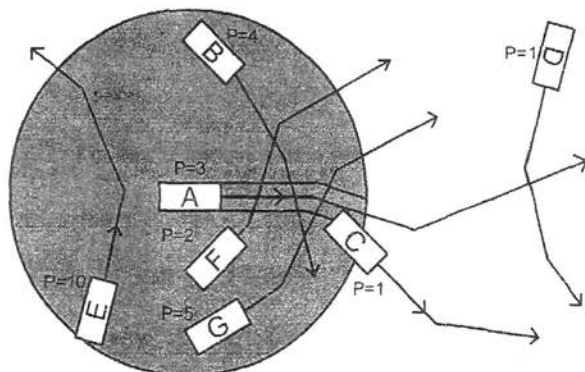


Рисунок 8. Иллюстрация принципов формирования множеств агентов, учитываемых при принятии решения о выборе ускорения

Рисунок 8 иллюстрирует принципы формирования множеств F и B . Рассматривается построение этих множеств для агента A . Агент C принадлежит множеству F , так как он является ближайшим агентом, находящимся на пути агента A . Агент C , согласно алгоритму, включается в множество F несмотря на то, что его приоритет меньше, чем у агента A . Агенты B и G попадают в множество B , так как:

- они находятся внутри круга внимания агента A ;
- их приоритет выше, чем у A ;
- их траектории пересекают траекторию A .

Агент E не попадает во множество B , потому что его траектория не пересекает траекторию A . Агент F не включается в B из-за более низкого, по сравнению с A , приоритета. Агент D вообще не рассматривается агентом A , так как находится вне круга его внимания.

Таким образом, предложенный алгоритм взаимодействия агентов на оперативном уровне, основанный на приоритетах, позволяет избегать ситуаций, когда агенты взаимно блокируют друг друга.

В третьей главе приводится описание основных аспектов программной реализации предложенной модели поведения агентов-участников движения в среде AnyLogic 6. В главе также описаны библиотеки, разработанные в ходе реализации модели и пригодные для использования в других разработках на платформе AnyLogic:

- библиотека вспомогательных геометрических вычислений;
- библиотека вычислений на графах.

В ходе реализации алгоритма поведения агента возникла необходимость обрабатывать пространственные взаимоотношения агентов между собой и с объектами среды. Так как AnyLogic не реализует алгоритмов двухмерной вычислительной геометрии, была создана библиотека геометрических вычислений.

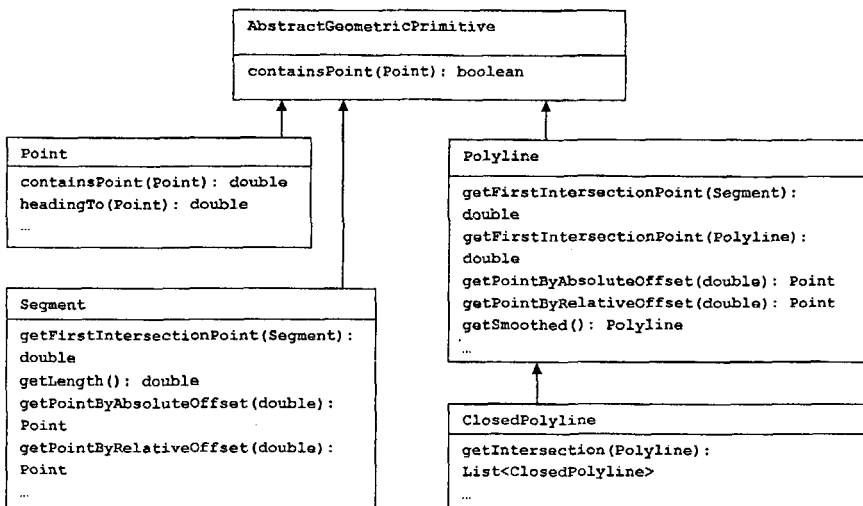


Рисунок 9. Диаграмма основных классов библиотеки геометрических вычислений

Основные геометрические примитивы реализованы на языке Java в виде классов. Диаграмма основных классов библиотеки представлена на рисунке 9. Любой класс, представляющий геометрический примитив, является

наследником абстрактного класса `AbstractGeometricPrimitive`, объединяющего общие свойства всех классов-наследников.

Основные методы этих классов следующие: `containsPoint` – определяет принадлежность точки множеству, `intersectswith` – определяет факт пресечения множеств, `getFirstIntersectionPoint` – определяет первую точку пересечения двух множеств.

Критерием качества разработанной модели агента-участника движения является ее быстродействие при экспериментировании с моделями реальных систем. Показателем быстродействия имитационной модели является максимальное количество единиц модельного времени, моделируемого за одну единицу реального времени. Эту характеристику назовем максимальной скоростью моделирования при заданной конфигурации модели. Разработанная модель агента используется в среде моделирования транспортных систем, в которой единицей модельного времени является секунда.

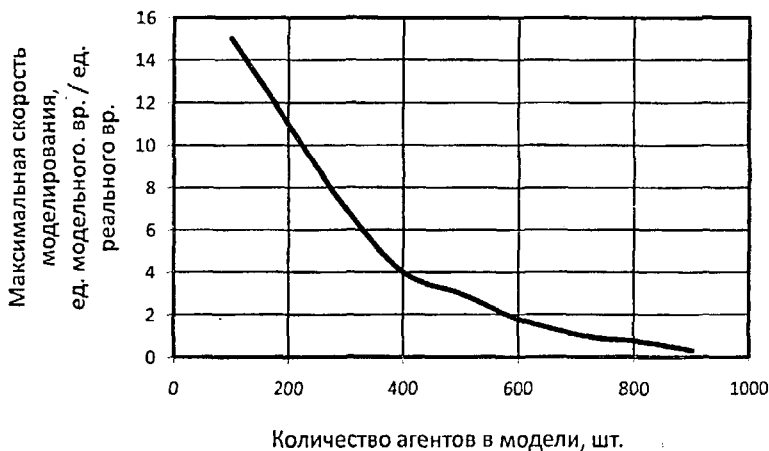


Рисунок 10. Данные испытаний быстродействия разработанной модели

Испытания для определения быстродействия проводились на персональном компьютере с тактовой частотой двухъядерного процессора – 2.16 GHz, объемом оперативной памяти – 3 ГБ под управлением операционной системы Microsoft Windows Vista.

На рисунке 10 показана зависимость максимальной скорости моделирования от количества агентов при моделировании средней транспортной системы с 10 перекрестками и 18 сегментами дорог и 58 светофорными

элементами. Среда способна обеспечивать режим реального времени моделирования при 715 агентах.

В четвертой главе описывается применение предложенной модели агента для исследования эффективности светофорного регулирования. Целесообразность исследования обуславливается возможностью повышения пропускной способности участков городской транспортной системы за счет учета суточных изменений транспортных потоков при светофорном регулировании. Показывается, что применение аппарата теории массового обслуживания для моделирования пропускной способности регулируемых перекрестков ограничено необходимостью проводить сложную процедуру идентификации параметров. В свою очередь, агентный подход позволяет избежать введения искусственной «дискретности» – разделения моделирования «подъезжающих» и «ожидающих в очереди» автомобилей, – учитывая взаимодействия агентов, находящихся в единой среде.

Предлагаемая методика разделяется на несколько этапов:

1. Сбор данных для моделирования. Собираются два набора данных:

$$T = \{t_{ij} | i = 1 \dots P, j = 1 \dots Q\}$$
$$Z = \{z_{ij} | i = 1 \dots 2N, j = 1 \dots K_i\},$$

где P – количество наблюдений, Q – максимальный номер машины, N – количество направлений, K_i – количество измерений на i -ом направлении, T_{ij} – время с начала разрешающей фазы до пересечения стоп-линии j -ой машиной в i -ом наблюдении, Z_{ij} – время (с начала суток) проезда j -ой машиной i -ой контрольной линии.

2. Задание структуры имитационной модели перекрестка с помощью созданного программного комплекса.
3. Формирование множеств функций $S = \{S_i(t) | i = 1 \dots N\}$ интенсивностей потоков по направлениям и $Q = \{Q_i(t) | i = 1 \dots N\}$ количества машин, ожидающих проезда перекрестка методом линейной интерполяции на основе собранных данных.
4. Идентификация разгонных параметров модели агента:
 - параметра «максимально возможное ускорение» A_{\max} . Поиск значения производится в диапазоне $[2.67, 3.19] \text{ м/с}^2$;
 - параметра «коэффициент разброса максимально возможного ускорения» dA_{\max} . Поиск производится в диапазоне $[0.78, 1.13]$.

Идентификация осуществляется путем запуска встроенного в AnyLogic оптимизатора OptQuest для параметров A_{\max} и dA_{\max} и критерием оптимальности вида

$$\min \sum_{j=1}^Q \sum_{k=1}^P (t_{jk}^* - t_{jk})^2,$$

где t_{jk}^* – время, прошедшее от включения проезда j-ой машиной стоп-линии в k-ом эксперименте.

- Идентификация параметра модели агента «коэффициент зависимости безопасной скорости сближения от расстояния до впереди идущего агента» KV. Поиск значения в интервале [1.24, 1.76] проводится путем запуска оптимизатора OptQuest с критерием оптимальности вида:

$$\min \sum_{k=1}^P \int (Q_k^*(t) - Q_k(t))^2 dt,$$

где $Q_k^*(t)$ – смоделированная зависимость количества машин, ожидающих проезда в k-ом направлении, $Q_k(t)$ – зависимость количества машин, ожидающих проезда в k-ом направлении, построенная путем линейной интерполяции.

- Формирование множества интервалов времени регулирования $W = \{W_i | i = 1 \dots M\}$, где M – количество интервалов.
- Для каждого интервала W_i запускается подбор длительностей L_1, \dots, L_V фаз светофорного регулирования, причем для сокращения пространства перебора значений используются ограничения $L_{\varphi(1)} \leq \dots \leq L_{\varphi(V)}$, где $\varphi(n)$ – порядковый номер направления n в упорядоченном по среднему потоку за период W_i кортеже номеров направлений. Подбор производится с помощью встроенного в AnyLogic оптимизатора OptQuest. Целевой функционал имеет вид $\min \bar{t}_a$, то есть минимизируется среднее (усредненное по всем агентам) время проезда агентом моделируемого участка.

Результатом применения методики является множество значений $L = \{L_{ij} | i = 1 \dots M, j = 1 \dots V\}$ длительностей фаз светофорного регулирования для каждого интервала W_i и для каждой фазы с номерами 1, ..., V. Кроме того, для каждого интервала определяется среднее время проезда агентом исследуемого перекрестка, которое является показателем эффективности светофорного регулирования. Этот показатель можно сравнить с аналогичным показателем исходной системы.

В заключении сформулированы основные теоретические и практические результаты диссертационной работы:

- Предложена трехуровневая модель агента, отражающая поведение участника дорожного движения при планировании маршрута поездки, выборе траектории движения по участку дороги и тактическом маневрировании. Предложенная модель может использоваться для моделирования движения транспорта в составе имитационных моделей различных организационно-технических систем.
- Создан метод построения траектории движения агента при возникновении на его пути множества препятствий, учитывающий исходную траекторию движения агента.
- Разработан и реализован программный комплекс, реализующий предложенную модель агента на платформе AnyLogic и учитывающий существующие модели аспектов поведения участников дорожного движения.
- Разработана методика численной оценки и нахождения оптимизированной схемы светофорного регулирования, основанная на использовании предложенной имитационной модели агента и системы OptQuest.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях из списка ВАК

1. Малыханов А.А., Черненко В.Е. Среда низкоуровневого имитационного моделирования транспортных систем // Автоматизация в промышленности. М., 2010, № 1. – С. 34 – 37
2. Малыханов А.А., Черненко В.Е., Былина П.В. Оценка эффективности траекторий патрулирования акватории на основе имитационной модели // Автоматизация процессов управления. Ульяновск, 2010, № 2. – С. 31 – 33
3. Кумунжиев К.В., Черненко В.Е., Малыханов А.А. Алгоритм построения траектории движения агента в модели транспортной системы // Известия Волгоградского государственного технического университета. Волгоград, 2010, № 11(71). – С. 29 – 31

Другие публикации

4. Черненко В.Е., Малыханов А.А. Библиотека геометрических объектов для AnyLogic 6 // Ученые записки УлГУ, серия Математика и информационные технологии. Ульяновск: УлГУ, 2009, № 1(2). – С. 179 – 181
5. Кумунжиев К.В., Малыханов А.А., Черненко В.Е. Разработка системы имитационного моделирования транспортных узлов // Ученые записки

- УлГУ, серия Математика и информационные технологии. Ульяновск: УлГУ, 2009, № 1(2). – С. 108 – 110
6. Малыханов А.А. Алгоритм поведения агента в имитационной модели транспортной системы // Ученые записки УлГУ, серия Математика и информационные технологии. Ульяновск: УлГУ, 2009, № 1(2). – С. 104 – 107
 7. Малыханов А.А., Черненко В.Е. Классификация агентных имитационных моделей // Труды VII Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических систем и процессов». Ульяновск: УлГУ, 2009. – С. 179 – 181
 8. Черненко В.Е., Малыханов А.А. Алгоритм построения траектории движения агента в модели транспортной системы // Труды VII Международной конференции «Математическое моделирование физических, экономических, технических систем и процессов». Ульяновск: УлГУ, 2009. – С. 279 – 280
 9. A.A. Malykhanov, K.V. Kumunjiev, V.E. Chernenko. Modeling Driver Behavior for Microscopic Traffic Simulation // Interactive Systems and Technologies: the Problems of Human-Computer Interaction. Volume III. – Collection of scientific papers. Ulyanovsk: ULSTU, 2009. – P. 402 – 407
 10. Малыханов А.А., Кумунжиев К.В., Черненко В.Е. Среда имитационного моделирования транспортных систем // Сборник трудов четвертой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности (ИММОД-2009). СПб.: ЦНИИТС, 2009. – С. 284 – 287
 11. Кумунжиев К.В., Малыханов А.А., Нечаева Н.Н. AnyLogic как среда практикума по моделированию // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: сборник трудов Седьмой Открытой Всероссийской конференции. Йошкар-Ола: Мар. гос. ун-т., 2009. – С. 108 – 109
 12. A. A. Malykhanov, V. E. Chernenko. Extensible Framework for Microscopic Traffic Simulation // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (Ph. D. Colloquium). Austin, TX, 2009. – ISBN: 978-1-4244-5772-4
 13. Черненко В.Е., Малыханов А.А. Анализ зависимости пропускной способности регулируемого участка от длительности светофорных фаз // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования. Сборник научных трудов школы-семинара ИМАП-2010. Ульяновск: УлГТУ, 2010. – С. 524 – 527

Подписано в печать 25.02.2011.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0.
Бумага книжно-журнальная.
Тираж 100 экз. Заказ № 15/45

Отпечатано с оригинал-макета в Издательском центре
Ульяновского государственного университета
432000, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42