



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 85 за 2015 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

**Бабичева Т.С., Бабичев С.Л.,
Осипов В.П.**

Архитектура и методическое
обеспечение модуля
имитационного
моделирования
транспортных процессов в
сетевой компьютерной
лаборатории

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Бабичева Т.С., Бабичев С.Л., Осипов В.П. Архитектура и методическое обеспечение модуля имитационного моделирования транспортных процессов в сетевой компьютерной лаборатории // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 85. 28 с.

URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-85>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

Т. С. Бабичева, С. Л. Бабичев, В. П. Осипов

Архитектура
и методическое обеспечение
модуля имитационного моделирования
транспортных процессов
в сетевой компьютерной лаборатории

Москва — 2015

Бабичева Т.С., Бабичев С.Л., Осипов В.П.

Архитектура и методическое обеспечение модуля имитационного моделирования транспортных процессов в сетевой компьютерной лаборатории

Обсуждаются функционал модуля имитационного моделирования транспортных процессов, его архитектура и методическое обеспечение вычислительной процедуры при решении типовых транспортных задач определения задержек автомобилей на управляемом перекрёстке сложной структуры. Проведена оценка возможности применения методов теории систем массового обслуживания, получены аналитические оценки параметров оптимального и устойчивого решения для регулируемых перекрестков. Применена расчетная схема Трайбера, которая адаптирована для случаев движения автомобилей по многополосным дорогам и управляемым перекресткам. Представлены результаты апробации модуля на вычислительном комплексе кластерного типа. Проведен сравнительный анализ результатов решения типовых задач в серии вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: имитационное моделирование транспортных процессов, сетевая компьютерная лаборатория, вычислительный эксперимент

Babicheva Tatiana Sergeevna, Babichev Sergey Leonidovich, Osipov Vladimir Petrovich

Architecture and methodological support of the module simulation of transport processes in a networked computer lab

The article discusses the functionality of the simulation module of transport processes, its architecture and methodical support of the computational procedure for solving typical transport problems determining vehicle's delays on the signal-controlled crossroads of the complex structure. An assessment of the possibility of usage of the queuing theory was performed, analytical estimates of the parameters optimal and sustainable solutions for regulated intersections were obtained. Treiber's calculation scheme, which is adapted for the cases of car traffic on multilane roads and controlled intersections was used. The results of testing the module on a computing cluster type complex have been presented. Comparative analysis of solutions of typical problems in a series of numerical experiments was conducted.

Key words: simulation modeling of transport processes, network computer lab, numerical experiment

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, Соглашение № 14.604.21.0052, грантов РФФИ 13-01-00781, 13-01-12046 офи-м

Введение

Практически все крупные города России сталкиваются сегодня с транспортными проблемами, приводящими к значительным экономическим потерям, ухудшению городской среды, негативным социальным последствиям. Среди актуальных задач, которые необходимо решать для улучшения транспортной ситуации в больших городах, можно выделить задачу использования светофорного регулирования (В Москве светофоров более 2000) для оперативного управления транспортными потоками.

В качестве примера системы регулирования можно привести комплекс SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System), первоначально разработанную в Австралии, используемую более чем в 150 городах 25 стран (<http://www.scats.com.au>).

Современное решение такого рода проблем основано на применении новых концепций и методов в проектировании и управлении транспортными процессами, построенных на современных информационных технологиях, методах моделирования, прогнозирования и экспертиз. Необходимость дальнейшего совершенствования используемых подходов вызвана обострением транспортных проблем в больших городах и, как следствие, возрастанием цены ошибки при неправильных управленческих решениях [1]. Реализация технологий управления движением транспортных систем осуществляется на основе информационной модели (см. рис. 1).



Рис. 1. Система информационно-аналитического обеспечения принятия решений при управлении транспортными процессами

В ней продемонстрирована требуемая методическая база и место математического моделирования в процессе формирования управленческих решений. Структурная схема содержит следующие основные компоненты: оценку динамической среды и ее характеристик по результатам мониторинга, оценку компонент прикладных моделей, математическое моделирование текущей ситуации и прогноз ее развития, выработку практических рекомендаций, анализ альтернатив и принятие решений. Однако, как в России, так и за рубежом, транспортные задачи все еще представляют существенную проблему с точки зрения практического применения имеющихся инструментов моделирования.

Очевидна потребность в развитии формализованных методов анализа и прогноза характеристик динамических систем [2]–[8] и транспортного потока (ТП) в частности, технологий организации и проведения вычислительного эксперимента [4], [5], [9]. Организация за рубежом и в России масштабных исследований по транспортному моделированию и сопутствующим проблемам [10]–[18] отражает настоятельную потребность в совершенствовании и разработке новых вычислительных и информационных технологий, адекватных уровню перечисленных выше проблем.

Объектом исследования в работе выбрана область практических приложений, связанная с моделированием транспортных потоков с учетом взаимодействия участников движения между собой и системами светофорного регулирования движения на перекрестках сложной структуры. Этот выбор объясняется необходимостью повышения эффективности управления ТП в условиях напряженного движения городского транспорта. Исследование закономерностей функционирования перекрестков при различных режимах управления в модельных условиях позволяет отрабатывать наиболее рациональные схемы такого управления без дорогостоящих натурных экспериментов. В качестве модельного полигона предлагается разворачивание сетевой компьютерной лаборатории.

Среда имитационного моделирования сетевой компьютерной лаборатории

Наиболее эффективное использование средств транспортного моделирования для практических задач возможно с привлечением многопроцессорных компьютеров с широким распараллеливанием процессов вычислений. Модульная организация интегрированной среды моделирования (рис. 2) позволяет обеспечить качественно новые возможности использования информационных технологий при принятии решений в сложной проблемной области прикладного моделирования транспортных систем.

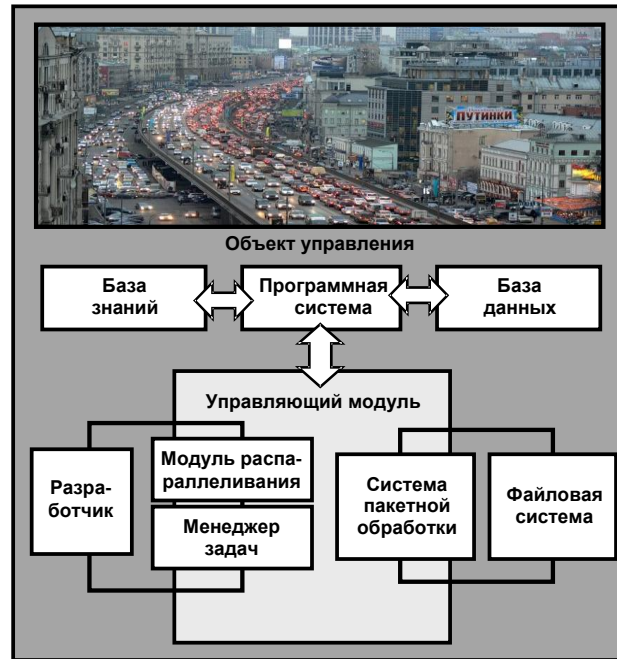


Рис. 2. Модульная структура среды моделирования

Программная система среды моделирования включает следующие основные элементы:

- графический интерфейс разработчика к ресурсам управляющей компоненты, содержащей графические предметно-ориентированные средства для выбора задачи, подготовки данных и анализа результатов вычислительного эксперимента;
- управляющий модуль, включающий менеджер задач для обеспечения доступа к информационному обеспечению системы;
- базу знаний, обеспечивающую поддержку функционирования системы и возможностей ее расширения за счет включения новых задач и алгоритмов обработки информации;
- базу данных типовых задач, обеспечивающую хранение и доступ к описанию типовых задач и результатов из решений.

Управляющий модуль является ядром программной системы и предназначен для выполнения последовательности операций при анализе и интерпретации результатов моделирования. С помощью этого модуля осуществляется работа со средствами моделирования и визуализации на основе предметно-ориентированного графического интерфейса. Выполняя основную функцию управления процессом функционирования программного комплекса, управляющий модуль открывает возможности доступа к информационному и программному обеспечению системы и реализуется с помощью менеджера задач, который обеспечивает централизованное управление задачами информационной среды моделирования. На основе объектно-ориентированного подхода менеджер задач регистрирует выполняемые задачи в базе данных задач, обеспечивает управление рабочими директориями задач в файловой

системе, осуществляет контроль их жизненного цикла, организует взаимодействие с системой распараллеливания задач.

Основой программной системы среды моделирования является набор программных средств подсистемы вычислительного эксперимента, которая также строится по модульному принципу.

Удовлетворить потребности пользователей по получению и обработке данных вычислительного эксперимента призваны соответствующие функциональные модули (рисунок 3). Схематично пользовательский графический интерфейс подсистемы можно разделить на четыре основных модуля:

- модуль выбора типовой задачи и ее параметров;
- модуль выбора дискретной модели и ее настроек;
- модуль настройки и запуска расчета;
- модуль визуализации и анализа результатов расчета.

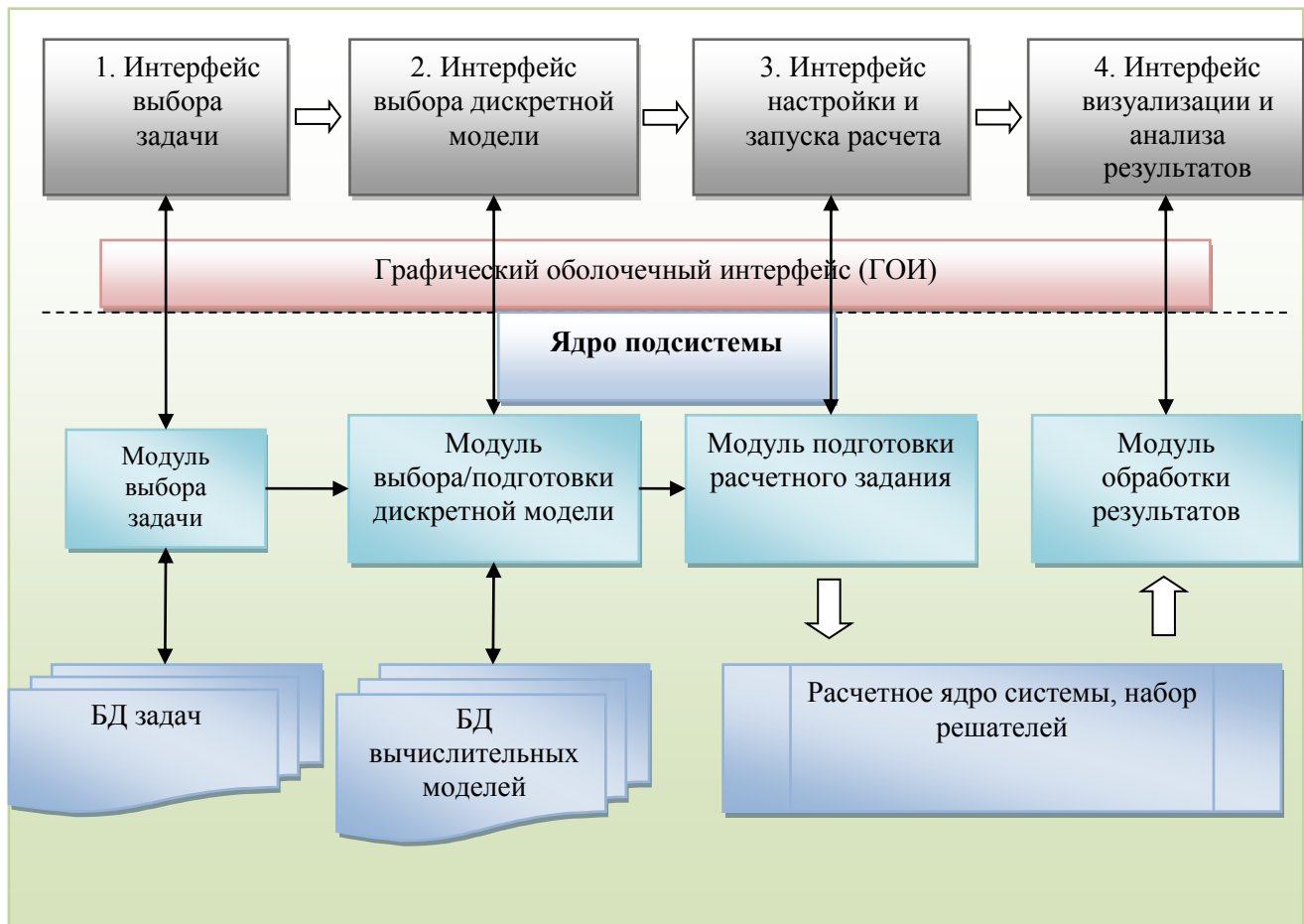


Рис. 3. Структурная схема подсистемы вычислительного эксперимента СКЛ

Первый модуль, как уже было упомянуто выше, предоставляет пользователю возможность с помощью уточнения характеристик задачи (начиная с дисциплины, к которой относится задача, заканчивая конкретным выбором из списка) выбрать для решения типовую задачу. Помимо этого, пользователь имеет возможность (если у него достаточно прав для этого)

изменить параметры задачи. Также для администраторов системы данный модуль предоставляет возможность модификации списков задач.

Второй модуль позволяет (в зависимости от привилегий пользователя) выбрать дискретную модель и настроить ее параметры. Экспертам и администраторам предоставляется интерфейс для создания новых и модификации существующих дискретных моделей. Заметим, что в случае создания новых вычислительных моделей со стороны системы происходят довольно существенные изменения, затрагивающие такую критическую ее часть, как расчетное ядро. Именно поэтому такая возможность предоставляется только двум высшим группам пользователей.

В третьем, интерфейсном, модуле пользователь (если у него достаточно привилегий) может настроить параметры расчета, такие как критерии завершения расчета, величины, контролируемые в процессе счета, и т.п.

Четвертый модуль предоставляет пользователю интерфейс для контроля текущего расчетного задания, последующего анализа и визуализации полученных результатов расчета.

Схематично типичный сеанс работы пользователя с системой состоит из следующих шагов: пользователь, последовательно уточняя критерии задачи, находит и выбирает искомую задачу. Система, в свою очередь, формирует список доступных для модификации параметров задачи и конкретных моделей, доступных для решения выбранной пользователем задачи. Также со стороны системы происходит наполнение второго интерфейсного модуля. В нем пользователь выбирает искомую модель и уточняет ее параметры. Далее в зависимости от пожеланий пользователя он, используя интерфейс модуля настройки и контроля расчета, устанавливает параметры расчета и запускает задачу на счет. Далее системой запускается задание на счет, причем некоторые промежуточные данные динамически могут отображаться уже в четвертом интерфейсном модуле, в котором по окончании счета пользователь имеет возможность проанализировать полученные результаты и при необходимости экспортировать их в удобном ему виде.

Базы данных (БД) подсистемы необходимы для информационного обеспечения процесса подготовки вычислений. Их актуальность будет постоянно расти, так как в связи с планируемым ростом объема получаемых данных возникнет проблема управления (поиска по различным ключам, удаления, сортировки и т.д.) их структурой, целостностью и доступностью. Объемы расчетных данных исчисляются гигабайтами и “ручной” поиск необходимого элемента зачастую будет представлять собой трудновыполнимую задачу даже для владельца данных и фактически невыполнимую – для постороннего человека.

Потоки данных при осуществлении функционального взаимодействия пользователей с СКЛ и ее элементов между собой можно представить следующей диаграммой:

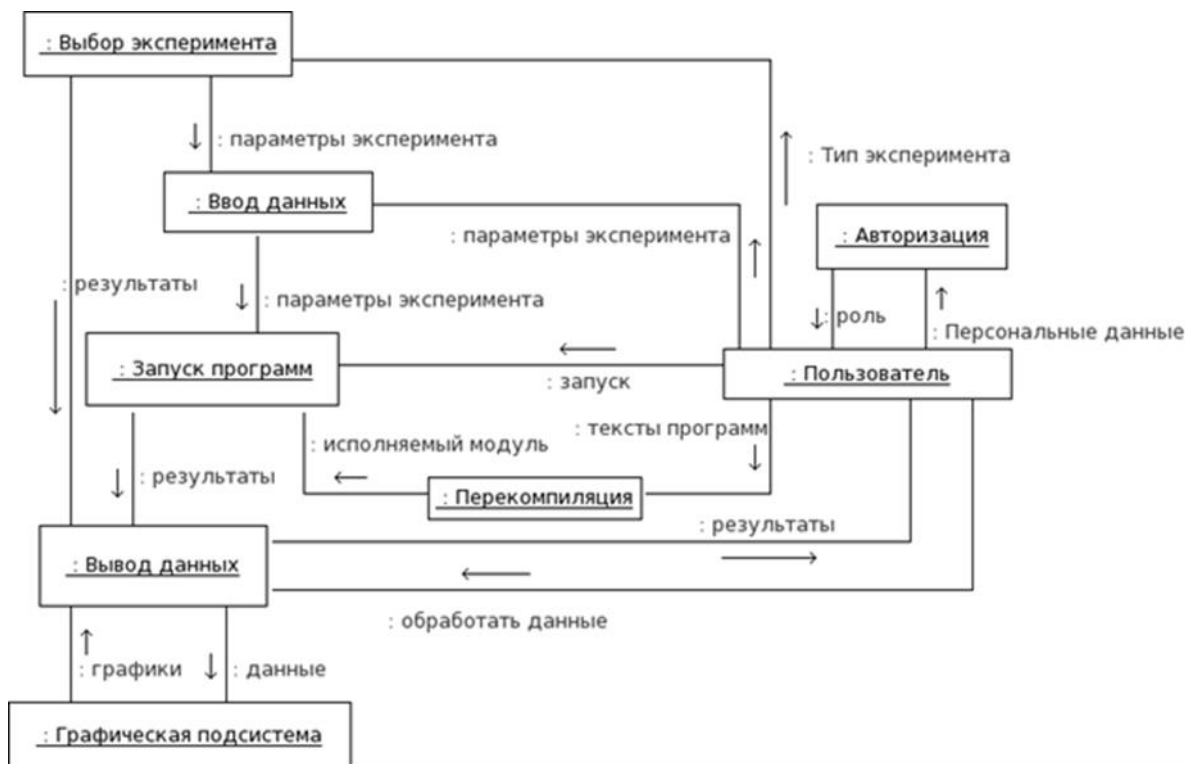


Рис. 4. Схема потоков данных в подсистеме
вычислительного эксперимента СКЛ

Общая характеристика имитационной модели и алгоритмов реализации типовых задач

В общем случае [2], [6] модели динамических объектов транспортных систем являются интегрированными, включающими в себя содержательно-описательную и формально-математическую составляющие. Объектами рассмотрения являются предметная область транспортных процессов и ее формальная модель, спецификация динамической сцены (ДС) транспортного потока и задача ее исследования, собственно модель ДС и алгоритмы реализации задачи.

Для исследования возможности управления транспортными процессами требуется создать имитационную модель, которая должна решать ряд типовых задач. Так как не существует и не может существовать модели, которая в ограниченное время способна точно описать все возможные сложные транспортные процессы, возникает задача построения такой модели, которая могла бы описать транспортные процессы с достаточной для практического применения адекватностью. Невозможно заранее определить, какой из многочисленных алгоритмов моделирования транспортных процессов позволит получить результаты с заданной точностью, поэтому в разрабатываемой системе должна быть предусмотрена возможность решения одних и тех же

задач различными методами. Применение операции сопоставления результатов использования различных моделей позволит усовершенствовать каждую из применяемых моделей.

Модуль имитационного моделирования транспортных процессов состоит из следующих компонент:

- Информационная компонента, описывающая свойства объектов моделирования, таких как характеристики транспортных средств, параметры дорог, транспортная схема, интенсивности транспортных потоков в различное время суток и другое.

- Вычислительная компонента, которая по параметрам объектов моделирования и математическим моделям определяет поведение объектов в заданной транспортной ситуации. Данная компонента допускает использование при одних и тех же входных данных различных математических моделей.

- Компонента визуализации, которая отображает в удобном виде процесс моделирования и его результаты.

- Компонента распараллеливания вместе с модулем задач, которая позволяет эффективно распределить вычислительные ресурсы между подзадачами, решаемыми в процессе исполнения математической модели.

Микромодель движения АТС

Появление ЭВМ позволило производить сложные численные эксперименты с помощью имитационного моделирования процессов, и, что особо важно, появилась возможность учитывать случайный характер транспортного потока. К моделированию обычно прибегают в тех случаях, когда изучаемые системы невозможно анализировать с помощью прямых или формальных аналитических методов.

Реально протекающие процессы в транспортных системах носят непрерывный характер, поэтому для их моделирования на ЭВМ требуется дискретизация. В настоящее время применяются две модели, в некоторых аспектах использующие похожие алгоритмы, но отличающиеся режимом дискретизации, вследствие чего имеющие различные эксплуатационные качества.

Во всех микроскопических моделях каждое АТС рассматривается как отдельный элемент транспортной системы и полагается, что ускорение конкретного АТС зависит от соседних АТС. Наибольшее влияние на поведение водителя оказывает АТС, движущееся впереди, лидирующее АТС, лидер. Таким образом, модель движения может быть описана формулой (1):

$$\frac{dv_a(t)}{dt} = \frac{v_a^0 + d_a(t) - v_a(t)}{t_a} + f_{a,(\alpha-1)}(t). \quad (1)$$

Здесь $f_{\alpha, (\alpha-1)}(t) \leq 0$ описывает отталкивающее воздействие лидера $(\alpha-1)$, которое есть общая функция от:

- относительной скорости $\Delta v_{\alpha}(t) = [v_{\alpha}(t) - v_{\alpha-1}(t)]$;
- скорости $v_{\alpha}(t)$ АТС α , влияющей на безопасную дистанцию до впереди идущего АТС;
- расстояния между головными частями АТС (расстояние брутто) $d_{\alpha}(t) = [x_{\alpha-1}(t) - x_{\alpha}(t)]$ или просвета (расстояние нетто) $s_{\alpha}(t) = [d_{\alpha}(t) - l_{\alpha-1}]$, где l_{α} означает длину АТС α .

Соответственно, для идентично ведущих себя АТС с $v_{\alpha}^0 = v_0$, $\tau_{\alpha=\tau}$ и $f_{\alpha, (\alpha-1)} = f$ получаем

$$f_{\alpha, (\alpha-1)}(t) = f(s_{\alpha}(t), v_{\alpha}(t), \Delta v_{\alpha}(t)).$$

Если пренебречь колебаниями во времени и предположить, что скорость может зависеть от трафика, то

$$v^e(s_{\alpha}, v_{\alpha}, \Delta v_{\alpha}) = v_0 + \tau f(s_{\alpha}, v_{\alpha}, \Delta v_{\alpha}),$$

при которой водитель α пытается адаптироваться. Можно значительно упростить обобщенную (поведенческую) модель (1):

$$\frac{dv_{\alpha}}{dt} = \frac{v^e(s_{\alpha}, v_{\alpha}, \Delta v_{\alpha}) - v_{\alpha}}{\tau}. \quad (2)$$

Модели клеточных автоматов – это частный случай микроскопических моделей транспортных потоков, основанный на дискретизации пространства-времени.

Модели клеточных автоматов интересны, в первую очередь, своей скоростью и своим сложным поведением в динамике, включая такие интересные феномены, как самоорганизующаяся критичность, формирование спиральных образцов, колеблющаяся или хаотическая последовательность состояний. Высокая скорость и эффективность вычислений в сочетании со следующими свойствами делают эти модели идеально подходящими для параллельных вычислений:

- дискретизация пространства в идентичные ячейки (узлы решетки) j размера Δx ;
- конечное количество возможных состояний $g(x)$;
- параллельное обновление по времени $t = i\Delta t$ с элементарным шагом Δt ;
- глобально применимые правила обновления;
- взаимодействия близкого порядка с конечным (небольшим) количеством соседних узлов.

Несмотря на эти упрощения, конечные автоматы и соответствующие им сеточные автоматы в газовых средах имеют широкое применение в приложениях для реалистического моделирования сыпучих сред или жидкостей, для расчета химических реакций и даже для моделирования лавин.

Их применение в моделировании динамики дорожного движения вызвало колоссальную активность в связи с попытками понять причины нестабильности трафика, ответственные за рваный ритм движения (stop-and-go) и за заторы как на автострадах, так и в городах. Первые модели клеточных автоматов для автострад были созданы Кремером с коллегами [14] (в 1987 году) и Нагелем и Шреккенбергом [15] (1992 год).

Клеточные автоматы описывают динамическое поведение менее детально, чем модели следования за лидером, но их упрощения позволяют исключительно быстро рассчитывать гигантское количество взаимодействующих АТС. Нагель и Шреккенберг в 1992 году предложили разбивать улицу на ячейки j длиной Δx , а время t на i интервалов длительностью $\Delta t = 1$ сек. Каждая ячейка или пустая, или содержит ровно одну единицу АТС со скоростью

$$v_i = \hat{v}_i \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (4)$$

где $\hat{v}_i \in \{0, 1, \dots, \hat{v}_{\max}\}$. Для автострад обычно выбирают размер ячейки в $\Delta x = 7.5$ метров и масштабируют желаемую скорость $\hat{v}_{\max} = v_0 \Delta t / \Delta x = 5$.

Позиции АТС обновляются параллельно согласно следующим правилам:

[1.] Движение. Продвинуть АТС вперед на $\hat{v}_i$ ячеек.

[2.] Ускорение. Если АТС не достигло максимальной скорости, увеличить скорость до $\hat{v}'_i = (\hat{v}_i + 2)$ согласно постоянному ускорению $\Delta x / (\Delta t)^2$.

[3.] Замедление. Если дистанция (то есть количество ячеек) до следующего АТС впереди есть $\hat{d}_i \leq \hat{v}'_i$, скорость уменьшается до $\hat{v}'_i = (\hat{d}_i - 1)$, иначе $\hat{v}'_i = \hat{v}_i$.

[4.] Рандомизация. С вероятностью p скорость уменьшается до $\hat{v}_{i+1} = (\hat{v}'_i - 1)$, если это приведет к неотрицательному числу, иначе $\hat{v}_{i+1} = 0$.

Заметим, что согласно правилу (3) водители всегда двигаются со скоростью ниже, чем промежуток перед ними, с разницей Δt . Таким образом, параметр Δt играет в одно и то же время роли шага обновления, времени адаптации τ и безопасного времени T . Более того, длина дискретизации Δt согласуется с минимальным требуемым пространством l' , то есть с инверсией плотности затора. Это делает модель Нагеля-Шреккенберга исключительно компактной и элегантной.

Параметр модели ("вероятность замедления") p описывает индивидуальные флуктуации скорости из-за задержки водителем процесса ускорения (несовершенное вождение). Для автострад Нагель и Шреккенберг

предлагают $p=0.5$, что приводит к относительно зашумленной динамике, в то время как $p=0.2$ и $\hat{v}_{\max}$ – подходящие значения для городского движения.

Кроме моделей медленного старта, многие модели клеточных автоматов имеют принципиальные различия с другими моделями трафика, особенно с моделями с детерминистическим подходом, например, таким, как рассмотренные ранее модели следования за лидером. Они требуют введения флуктуаций, для того чтобы объяснить появление участков с затруднённым движением. То есть в пределе $p \rightarrow 0$ дорожные затруднения должны исчезнуть. Это не говорит о низком качестве моделей клеточных автоматов, поскольку поведение водителей, очевидно, не безупречно и дорожный поток подвержен случайностям. Однако это поднимает следующие вопросы:

- Доминирующий или побочный эффект на процесс движения оказывают флуктуации?
- Какие виды наблюдений требуют рассмотрения факторов зашумления?
- Можно ли модели клеточных автоматов математически соединить с другими моделями?

Среди моделей, применяющих дискретизацию по времени, наиболее реалистические результаты показывает модель разумного водителя (Intelligent driver model) Трайбера. Статьи Трайбера и соавторов – хороший пример усилий добиться наилучшего приближения к тому, как ведут себя реальные водители. Полученную модель легко откалибровать, она робастная, в ней не случаются аварии, она численно эффективна, даёт реалистичное поведение при процессах ускорения и торможения и приводит к эмпирически наблюдаемым явлениям. Более того, фундаментальная диаграмма в данной модели соотносится с таковой, полученной по газо-кинетической теории нелокальной модели трафика. Это позволяет связать микро- и макромоделю. В других аспектах модель разумного водителя разделяет некоторые особенности модели Нагеля-Шрекенберга.

Ускорение в модели разумного водителя есть непрерывная функция от скорости v_α , промежутка между АТС $s_\alpha = (d_\alpha - l_{\alpha-1})$ и разницы скоростей Δv_α рассматриваемого (α) и движущегося впереди АТС:

$$\frac{dv_\alpha}{dt} = a_\alpha \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s_\alpha^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{s_\alpha} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

В этом выражении стратегия ускорения на свободной дороге $v_{free}(v) = a[1 - (v/v_0)^\delta]$ сочетается со стратегией торможения $v_{brake}(s, v, \Delta v) = -a(s^*/s)^2$, которая становится превалирующей, когда промежуток до лидирующего АТС перестает быть значительно большим, чем эффективный желаемый промежуток $s^*(v, \Delta v)$. Свободное движение характеризуется желаемой скоростью v_0 , максимальным ускорением a и показателем степени δ , определяющим, как

ускорение уменьшается с ростом скорости ($\delta=1$ соответствует линейному уменьшению). Параметры IDM v_0 , T , s_0 и b имеют приемлемую интерпретацию, они обоснованы, измеримы эмпирически и имеют реалистические значения [12] (табл. 1).

Таблица 1

Параметры модели IDM

Параметр	Автомобиль	Грузовик
Желаемая скорость v_0	120 км/ч	85 км/ч
Степень ускорения δ	4	4
Желаемый временной зазор T	1.5с	2.0с
Дистанция сближения s_0	2.0м	4.0м
Максимальное ускорение a	1.4м/с ²	0.7м/с ²
Желаемое торможение b	2.0м/с ²	2.0м/с ²
Фактор хладнокровия c	0.99	0.99

Желаемые скорости изначально полагаются удовлетворяющими распределению Гаусса с наложенным ограничением на максимальное и минимальное значения скоростей и определяются по плотности распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где μ – математическое ожидание, указывающее абсциссу максимума функции распределения, а σ^2 – дисперсия. Математическое ожидание есть средняя скорость, значение дисперсии принято за 0.3 средней скорости.

В равновесном трафике с $dv_\alpha/dt=0$ и Δv_α водители стремятся сохранить равновесную дистанцию, зависящую от скорости, $s_e(v_\alpha)$ перед впереди движущимся АТС $s_e(v) = s^*(v, 0)[1 - (v/v_0)^\delta]^{-1/2}$. Решение этого уравнения для равновесной скорости $v = v_e$ приводит к простому выражению только для $s''=0$ и $\delta=1, \delta=2$ или $\delta \rightarrow \infty$. Для особого случая $\delta=1$ и $s'=s''=0$ равновесная скорость равна

$$v_e(s) = \frac{-1 + \sqrt{1 + [4T^2(v_0)^2 s^2]}}{2v_0 T^2}.$$

Из этого уравнения и микро-макро отношения $s = (d-l) = (1/\rho - l) = (1/\rho - 1/\rho_{max})$ между промежутком и плотностью потока выводится соответствующая плотность $Q_e(\rho) = \rho(V_e(\rho))$ как функция плотности трафика ρ . Коэффициент ускорения δ влияет на область перехода между свободным и затрудненным движениями. Для $\delta \rightarrow \infty$ и $s''=0$ фундаментальная диаграмма принимает треугольную форму:

$$Q_e(p) = \min\left(\rho v_0, \frac{q - \rho(l + s')}{T}\right).$$

При уменьшении δ диаграмма становится все более гладкой.

Сравнение моделей, дискретизированных по времени, (Трайбера) и моделей клеточных автоматов (Нагеля-Шрекенберга)

Обе модели рассматривают АТС как минимальный объект, находящийся на дороге и являющийся агентом, реагирующим на внешние условия, такие как скорости самого АТС и окружающих его (находящегося перед ним, за ним, на соседних полосах).

Дискретизация по ячейкам в модели Нагеля-Шрекенберга позволяет на порядки (в 100-1000 раз) ускорить процессы микромоделирования, так как такая дискретизация хорошо позволяет использовать внутренний и внешний параллелизм вычислительных систем. Внутренний параллелизм заключается в том, что за одну операцию изменения можно обработать группу ячеек. Внешний параллелизм состоит в том, что возможным становится использовать такие средства, как CUDA, OpenCL, для моделирования поведения отдельных ячеек, позволяя при этом объединить моделирование групп ячеек средствами MPI. Все это вместе взятое позволяет эффективно использовать вычислительные кластеры, в том числе гетерогенные, и достигать скорости моделирования, превосходящей реальное время даже для больших задач.

Дискретизация по времени в модели Трайбера не обладает такими свойствами. Даже при использовании дискретного времени для всех, координаты каждого АТС принимают непрерывные значения для каждого, что вынуждает использовать более сложные и дорогостоящие с точки затрат ресурсов вычислительной системы методы, например, связные списки (в модели Нагеля-Шрекенберга для определения координат АТС достаточно массива заранее известной длины для каждой полосы). В отличие от модели Нагеля-Шрекенберга, параллельное обновление всех положений при данном методе возможно только для несвязных дорог. Сложность алгоритмов поиска свободного пространства для перестроения в общем случае зависит от количества АТС, находящихся на полосе и возрастает при возрастании этого количества.

С другой стороны, модель Нагеля-Шрекенберга не способна различить должным образом такие различные транспортные средства, как гружёную фуру длиной 7 метров и мотоцикл длиной два метра, хотя модель их поведения на дороге, очевидно, будет различной. Такие параметры, как максимальное ускорение и желаемое торможение, могут быть приняты во внимание, но такие параметры, как безопасное расстояние при перестроении и безопасное расстояние до впереди идущего АТС, будут неизбежно загрублены до размеров

ячейки (типично 7.5 метров). Также загрубленными оказываются скорости АТС до величины, кратной отношению размеров ячейки к единице дискретизации времени.

При дискретизации по времени в модели Трайбера таких проблем удастся избежать. Если для грузового автомобиля безопасная дистанция составляет, например, 4 метра, то для легкового автомобиля она может составлять 2 метра на одной и той же скорости. Это все можно учесть на основе подхода Трайбера. При преобладающем числе грузовых автомобилей в транспортном потоке поведение потока должно и будет отличаться от потока с преобладающим количеством легковых автомобилей и мотоциклов.

В работах [20], [21] рассматривалось влияние доли грузовых автомобилей в транспортном потоке на поведение потока. Плотности потоков, при которых начинали формироваться заторы, оказались связаны с количеством грузовых автомобилей существенно нелинейным образом.

Обобщение модели разумного водителя Трайбера на многополосные дороги и сложные перекрёстки

Обобщение метода Нагеля-Шрекенберга для многополосных дорог было реализовано в работе [18]. Подобное обобщение необходимо и для модели Трайбера. В оригинальном варианте модель Трайбера рассматривает только движение по однополосной дороге. В ней не учитываются такие факторы, как наличие нескольких полос, различные цели у различных участников движения, светофоры и прочее. Трайбер и его соавторы предпринимали несколько попыток обобщения данной модели на случаи многополосных дорог [16],[17]. У предложенных обобщений, как оказалось, имелся ряд недостатков. Главным недостатком являлось отсутствие параметра цели у движущегося АТС. Даже при приближении к перекрестку АТС могло произвольным образом менять полосу движения. Второй недостаток – излишняя жесткость математической модели перестроения. Критерий перестроения зависел от нескольких параметров модели, настроить которые оказалось трудной задачей. При небольшом изменении параметров модели поведение АТС менялось значительно; модель оказалась неустойчивой к небольшому изменению параметров. Например, если при одних значениях параметров существует ненулевая вероятность столкновения с АТС, движущимся на полосе перестроения, то при небольшом изменении параметров между АТС возникают излишние зазоры.

Была поставлена задача разработки обобщения удачной в остальных смыслах модели разумного водителя Трайбера [12] на случай многополосных дорог и перекрестков. В этой модели для каждого АТС задаются желаемая скорость в диапазоне $0 \dots V_{max}$, величина d – расстояние между текущим АТС и следующим перед ним, V_n – скорость текущего АТС. Правила обновления задаются моделью Трайбера. В обобщенную модель Трайбера были введены

вероятностные характеристики возможности смены полосы и необходимости смены полосы. Это позволило учитывать, в том числе, пересечение потоков транспортных средств при поворотах на перекрестке. Для рассмотренных методов был разработан комплекс компьютерных программ BTSSIM, реализующий математические модели, с помощью которого проведен ряд вычислительных экспериментов.

Рассмотренная микроскопическая модель была использована для решения задачи о движении АТС на регулируемом перекрестке. Рассматривалось движение АТС на перекрестке с заранее заданными неоднородными многоцелевыми потоками. Решалась задача оптимизации длительности фаз светофорного режима на сетке значений, обеспечивающих максимальную пропускную способность перекрестка при заданных интенсивностях потоков на каждом из направлений. Полученные распределения фаз были проверены на устойчивость к небольшим изменениям интенсивностей входящих потоков с различных сторон, что показало возможность работы с неточными данными.

Введем понятие эффективного числа полос, которое поясним следующим примером. Предположим, что поток АТС,двигающийся по шестиполосной дороге, доходит до Т-образного перекрестка. Предположим, что целью трети водителей является поворот налево, а целью остальных – движение прямо. В этом случае две крайние левые полосы займут АТС, у водителей которых цель – поворот налево. Поток АТС через светофор при включении зеленого сигнала для прямого движения будет не 6 000 АТС/час, а только 4 000 АТС/час. Эффективное число полос в этом случае равно 4 [19], [21].

Сформулируем следующее свойство и его следствие:

Свойство о равновесной максимальной пропускной способности на управляемом перекрестке.

Пусть имеется управляемый многополосный перекресток. Пусть имеется поток АТС с одного направления на фиксированной светофорной фазе. Пусть N – число полос на исходящей дороге, N_i – число полос на целевых дорогах, S – максимальная пропускная способность одной полосы, $\Omega_i(t)$ – очередь АТС с исходящей дороги в направлении i в момент времени t , $\Omega(t)$ – очередь АТС на исходящей дороге в момент времени t , $\Omega_a(t)$ – очередь тех АТС на исходящей дороге, которые могут продолжить движение на данной фазе в момент времени t .

Тогда математическое ожидание максимального проходящего потока с одного направления на управляемом перекрестке на данной фазе за время T равно:

$$E[S_{max} \cdot T] = \int_0^T \min(S \cdot N \cdot \frac{\Omega_a(t)}{\Omega(t)}, \sum_i S \cdot N_i \cdot \frac{\Omega_i(t)}{\Omega(t)}) dt.$$

Следствие об эффективном числе полос в отсутствии асимметрии очередей.

Пусть имеется управляемый многополосный перекресток (рис.5). Пусть имеется поток АТС с одного направления на фиксированной светофорной фазе. Пусть в начальный момент времени очередь на перекрестке отсутствует. Пусть q – математическое ожидание входящего потока с данного направления, k – математическое ожидание потока АТС, которые могут продолжить движение на данной фазе, S – максимальная пропускная способность одной полосы, N – число полос на исходящей дороге, N_i – число полос на целевых дорогах, k_i – математическое ожидание потока АТС, способных продолжить движение в направлении i на данной фазе.

Тогда математическое ожидание максимального проходящего потока с одного направления на данном управляемом перекрестке на данной фазе равно:

$$E[S_{max}] = \min \left(S \cdot N \cdot \frac{k}{q}, \sum_i S \cdot N_i \cdot \frac{k_i}{q} \right).$$

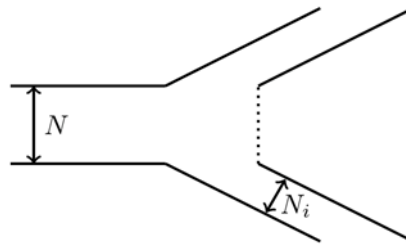


Рис. 5. Иллюстрация к свойству о равновесной пропускной способности управляемого перекрестка

Для решения задачи поиска ожидаемых задержек, возникающих при пересечении управляемого перекрестка с фиксированными длительностями фаз применен аппарат теории систем массового обслуживания, который к транспортным задачам на многополосных дорогах практически не применялся. В исследовании данных задач, например, необходимо учитывать, что время обслуживания на многополосных перекрестках – величина, зависящая от текущей светофорной фазы и распределения целей движущихся АТС.

Вводятся следующие сокращения и обозначения:

c – сигнальный цикл;

c_i – время длительности i – й фазы;

q – поток входящего трафика;

S – максимальный поток проходящего перекресток трафика;

Ω_0 – ожидаемая очередь переполнения из предыдущих циклов.

Рассмотрен простой поток – Пуассоновский процесс АТС, прибывающих к светофору с фиксированными временами фаз. Задержка АТС на светофоре равна времени, потраченному АТС на перекрестке на ожидание. Общая задержка АТС во время одного сигнального цикла как сумма компонент, получающихся при каждой фазе цикла, выражается как

$$W = \sum_{i=1}^4 W_i,$$

где W_i – общая задержка АТС, вызванная i – й фазой,

$$W_i = \int_{\sum_{j=1}^{i-1} c_j}^{\sum_{j=1}^i c_j} \Omega(t) dt.$$

Воспользовавшись понятием эффективного числа полос, получаем, что если k_i – интенсивности потоков, которые могут продолжать движение в i -той фазе, то проходящий поток будет равен

$$E[S_i] = S \cdot \frac{k_i}{q}.$$

Общий результат можно сформулировать следующим образом:

$$E[W] = c\Omega_0 + \frac{P_1 c_1^2}{2} + \frac{P_2 c_2^2}{2} + c_2 P_1 c_1 + \frac{P_3 c_3^2}{2} + c_3 (P_1 c_1 + P_2 c_2) + \frac{P_4 c_4^2}{2} + c_4 (P_1 c_1 + P_2 c_2 + P_3 c_3),$$

где $P_i = q - E[S_i]$ – так называемые "избыточные потоки".

Пусть P_{ij} – избыточный поток для дороги с номером i на фазе j , Ω_{i0} – начальная очередь АТС на данной дороге.

При рассмотрении математического ожидания суммарной задержки АТС за время T со всех направлений для одного перекрестка с четырьмя фазами, то есть за T/c светофорных циклов, получается [22]:

$$\begin{aligned} E[W] = & c \left(\sum_{i=0}^{\frac{T}{c}} \left(\sum_{j=1}^4 \max(\Omega_{j0} + \sum (c_i P_{ji}), 0) + c_1 \sum_{i=1}^4 P_{i1} \right) (c_1 / 2 + c_2 + c_3 + c_4) + \right. \\ & \left. + (c_2 \sum_{i=1}^4 P_{i2}) (c_2 / 2 + c_3 + c_4) + (c_3 \sum_{i=1}^4 P_{i3}) (c_3 / 2 + c_4) + (c_4 \sum_{i=1}^4 P_{i4}) (c_4 / 2) \right) \cdot \frac{T}{c}. \end{aligned}$$

Для конкретных перекрестков величины P_{ij} можно считать постоянными. Решение этой задачи в общем виде достаточно громоздко и разбивается на множество случаев в зависимости от этих величин.

Для перекрестка двухполосных дорог, просчитанного численно в работе [22], была рассчитана общая задержка за светофорный цикл со всех направлений.

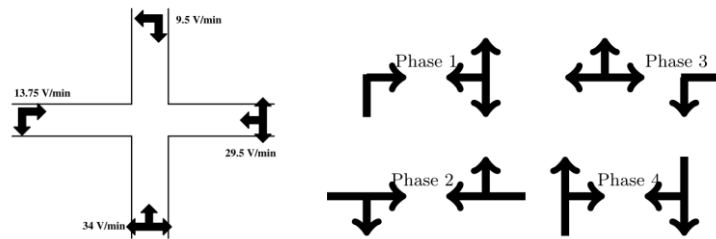


Рис. 6. Перекресток и фазы светофора

Задача была сведена к решению проблемы минимизации общих задержек в единицу времени: $E(W)/T$, то есть, к минимизации функции

$$F = (c \cdot \frac{1}{2}(\frac{T}{c} + 1) \frac{T}{c} ((\max(14c_1 - 26c_2 + 34c_3 - 6c_4, 0) + \\ + \max(13.75c_1 + 13.75c_2 - 46.25c_3 + 13.75c_4, 0) + \\ + \max(9.5c_1 + 9.5c_2 + 9.5c_3 - 51.5c_4, 0) + \max(-31.5c_1 + 9.5c_2 - 11.5c_3 + 29.5c_4, 0)) + \\ + (c_1(5.75)(c_1/2 + c_2 + c_3 + c_4) + c_2(6.75)(c_2/2 + c_3 + c_4) + \\ + c_3(-14.25)(c_3/2 + c_4) + c_4(-14.25)(c_4/2)) \cdot \frac{T}{c}) / T$$

на пирамиде

$$c_1 \geq 0,$$

$$c_2 \geq 0,$$

$$c_3 \geq 0,$$

$$c - c_1 - c_2 - c_3 \geq 0.$$

Решение этой задачи в общем зависит от отношения T/c , количества рассматриваемых циклов, но полученное решение асимптотическое и практически не подвержено колебаниям начиная с $T/c = 50$ (см. табл. 2).

Таблица 2

Зависимость оптимального значения c_i^*/c от количества циклов T/c

c_1^*/c	c_2^*/c	c_3^*/c	c_4^*/c	T/c
0.208502	0.368045	0.229767	0.193685	40
0.209071	0.367474	0.2292	0.194255	50
0.209071	0.367473	0.229201	0.194255	60
0.209071	0.367474	0.2292	0.194255	70
0.209071	0.367473	0.2292	0.194255	80
0.209071	0.367474	0.2292	0.194255	90
0.209071	0.367474	0.2292	0.194255	100

Движение на кольцевой автодороге. Далее рассматривается моделирование движения на кольцевой автостраде, закрученной в одну сторону. Рассматриваемая автострада представлена в виде, рассмотренном на рис. 7.

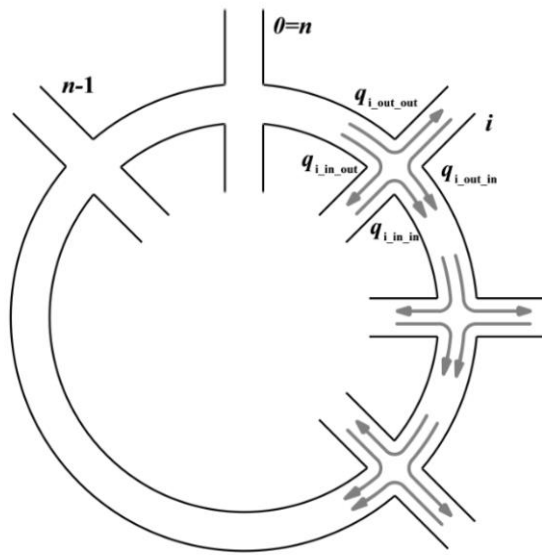


Рис. 7. Кольцевая автострада

Здесь:

под q_i подразумевается поток трафика от узла с номером i к узлу с номером $i+1$;

под $q_{i,out,out}$ – поток исходящего трафика из i -го узла в направлении от кольца;

под $q_{i,in,out}$ – поток исходящего трафика из i -го узла в направлении внутрь кольца;

под $q_{i,out,in}$ – поток входящего трафика из i -го узла в направлении от кольца;

под $q_{i,in,in}$ – поток входящего трафика из i -го узла в направлении внутрь кольца.

Моделирование движения осуществляется для некоторой "матрицы корреспонденций" Q , имеющей следующий вид:

Таблица 3

Матрица корреспонденций на кольцевой дороге

	0_{in}	0_{out}	...	...	$(n-1)_{out}$
0_{in}	$\times$	$Q[0, in, 0, out]$			
0_{out}	$Q[0, out, 0, in]$	$\times$			
$\vdots$			$\times$		
$\vdots$					
$(n-1)_{out}$					$\times$

Для удобства вычислений ячейки нумеруются не в виде $2n \times 2n$, а в виде $Q[i, in/out, j, in/out]$, то есть представление матрицы корреспонденции есть четырехмерная матрица $n \times 2 \times n \times 2$. Для численной записи в данной матрице in обозначает 0, а out обозначает 1. Под $Q[i, in, j, out]$ подразумевается число АТС

в единицу времени, желающих попасть с внутренней дороги i -го узла на внешнюю дорогу j -го узла.

Пусть N_i – число полос у соответственных побочных дорог и N – число полос на кольцевой автостраде. Число полос у въездов полагается всегда достаточным для пропуска всех желающих в случае полностью зеленого сигнала, в таком случае можно использовать следствие об эффективном числе полос. Автострада принимается постоянной ширины, максимальная пропускная способность одной полосы – константа, равная S . Рассчитана максимальная пропускная способность рассматриваемой автострады в зависимости от матрицы корреспонденций и пропускных способностей главной и побочной дорог.

Ранее рассмотренная модель движения на изолированном перекрестке обобщена и расширена на данный случай.

При движении по ранее показанной схеме математическое ожидание максимального проходящего потока с главной дороги на n -той фазе есть

$$E[S_i^n] = S \cdot N \cdot \frac{k_i^n}{q_{i-1}},$$

с побочных дорог –

$$E[S_{i,u}^n] = S \cdot N_i \cdot \frac{k_{i,u}^n}{q_{away,i,u}}.$$

Здесь $q_{away,i,u} = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{l=0}^1 Q[j,l,i,u]$ – поток АТС, желающих выехать на i -м узле в направлении $u(in/out)$,

k_i^n – соответственные интенсивности потоков АТС, которые могут продолжать движение в n -й фазе с главного направления,

$k_{i,u}^n$ – соответственные интенсивности потоков АТС, которые могут продолжать движение в n -й фазе с побочного направления $u(in/out)$.

Для регулируемых светофоров на магистрали с односторонним движением обычно используется цикл из 3 светофорных фаз.

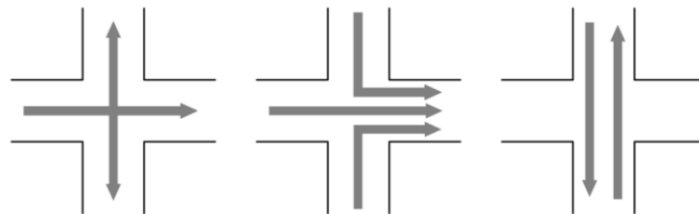


Рис. 8. Возможная схема организации движения на узле магистрали с односторонним движением

Далее рассматриваются светофорные фазы (рис. 8).

Пусть $q_{in,i,u}$ – поток, приходящий по второстепенной дороге узла i с направления u .

$$q_{in,i,u} = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{l=0}^1 Q[i, u, j, l].$$

Тогда:

$$c^i \cdot E[q_i] = (c_1^i + c_2^i) \cdot \left(S \cdot N \cdot \frac{q_{i-1} - \sum_{u=0}^1 q_{away,i,u}}{q_{i-1}} \right) + \\ + c_2^i \cdot (S \cdot N_i \cdot \frac{q_{in,i,0} - Q[i, 0, i, 1]}{q_{in,i,0}} + S \cdot N_i \cdot \frac{q_{in,i,1} - Q[i, 1, i, 0]}{q_{in,i,1}}),$$

что дает рекуррентное соотношение, позволяющее от i -го узла перейти к $i+1$ -му, и это позволяет замкнуть модель.

Задача минимизации общих задержек, возникающих при преодолении кольцевой автострады.

"Избыточные потоки" с каждого направления для каждой фазы равны

$$P_i^n = \max(q_{i-1} - E[S_i^n], 0),$$

$$P_{i,u}^n = \max(q_{i,u} - E[S_{i,u}^n], 0).$$

Зависимость P от Q и q_0 получается подстановкой найденных значений и рекуррентным получением q_{i-1} .

Задержка, возникающая при пересечении i -го узла всех АТС равна:

$$E[W_{sum}^i] = c\Omega_{sum0_i} + \frac{P_{sum1_i}(c_1^i)^2}{2} + \frac{P_{sum2_i}(c_2^i)^2}{2} + c_2^i P_{sum1_i} c_1^i + \\ + \frac{P_{sum3_i}(c_3^i)^2}{2} + c_3(P_{sum1_i} c_1^i + P_{sum2_i} c_2^i). \quad (5)$$

Важно учесть, что "избыточные потоки" зависят от потоков по главным дорогам, зависящих от сигнального цикла, а также что, в отличие от задачи об изолированном перекрестке, изначальные очереди в общем виде зависят от ранее лежащих узлов, а значит, и от сигнального цикла.

Программный комплекс моделирования движения на кольцевой дороге основан на формуле (5) и предназначен для определения оптимальных фаз светофоров, расположенных на кольцевой дороге.

Входными данными программы являются значения коэффициентов $\Omega_{i,j}$, где $i \in \{1, \dots, N\}$ и $j \in \{In, Out\}$, а также коэффициентов $Q_{i,j,k,l}$, где $i, k \in \{1, \dots, N\}$; $j, l \in \{in, out\}$, и коэффициентов $q_{0i}, i \in \{1, \dots, N\}$.

Первый режим работы – нахождение оптимального решения в предположении, что все светофоры на кольцевой дороге имеют одинаковое распределение фаз, заключается в нахождении вектора коэффициентов (c_1, c_2, c_3) , связанных условием $c_1 + c_2 + c_3 = 1$, при заданных значениях коэффициентов $\Omega_{i,j}$, $Q_{i,j,k,l}$ и q_{0i} , который минимизирует функцию задержек (1). Эта задача решается методом расчета по сетке возможных значений c_1, c_2, c_3 с заданным шагом дискретизации.

Второй режим работы, нахождение оптимального решения в предположении, что для каждого из светофоров определяются собственные распределения фаз, заключается в определении набора векторов $(c_{1,i}, c_{2,i}, c_{3,i}, i \in \{1, \dots, N\})$ при тех же исходных данных, минимизирующего функцию задержек (1). Данная задача есть задача оптимизации функции с $2 \cdot N$ переменными (переменная $c_{3,i}$ связана с остальными переменными выражением $c_{3,i} = 1 - c_{1,i} - c_{2,i}$).

Апробация модуля микроскопического имитационного моделирования проводилась на вычислительном кластере из 6 вычислительных узлов, каждый из которых содержал два процессора Intel Xeon 2670 с восемью вычислительными ядрами, допускающими параллельное исполнение 16 вычислительных потоков, и оперативную память в 128Gb. Вычислительные узлы были связаны по интерфейсу InfiniBand 56Gb. Кластер работал под операционной системой CentOS 6.2.

Модуль микромоделирования по обобщенной модели Трайбера может исполняться в нескольких режимах:

- Режим MPI, при котором исполнительная система, возможно, кластера, порождает требуемое количество идентичных копий программы, каждая из которых исполняется на собственном вычислительном узле. Каждая из копий, в свою очередь, может использовать самостоятельно несколько вычислительных потоков (этот режим более эффективен, чем порождение на каждом узле процессов, количество которых равно количеству исполнительных ядер узла, но не может быть проконтролирован системой очередей кластера, поэтому должен применяться с осторожностью). Процесс под номером 0 собирает информацию со всех запущенных процессов и консолидирует результаты.

- Автономный режим, при котором программа запускает нужное количество вычислительных потоков, один из которых управляет другими и консолидирует результаты.

- Режим GRID-вычислений, при котором программа выступает в качестве узла распределенной метасистемы. Метасервер этой метасистемы планирует исполнение ряда программ (подзадач). Каждый из экземпляров программы, исполняющейся в режиме GRID, обращается к метасерверу за своей подзадачей, передавая тому результаты исполнения. Этот режим удобен при наличии вычислительных узлов, располагающихся физически в разных местах, а также при наличии некоторого количества узлов под управлением разных

операционных систем (например, Windows, Linux и OS X). Программа реализует проблемную сущность метакомпьютинга.

Особенности данной программы заключаются в том, что она может исполняться в нескольких режимах параллельной обработки: многопоточном, MPI и GRID. Единицей распараллеливания является многополосная дорога, моделирование которой проводится с использованием одного вычислительного ядра. В режиме MPI результаты вычисления выходящих потоков одной дороги на одном ядре могут передаваться в качестве входных данных для моделирования другой дороги, позволяя, таким образом, одновременно использовать большое количество вычислительных ядер для моделирования сложной конфигурации. В режиме GRID несколько MPI программ могут исполняться под общим управлением.

Для визуализации работы программ, исполняющихся в режиме MPI и GRID, отдельно применялась программа GraphicsServer, исполняющаяся на одном из вычислительных узлов (управляющем узле). Информация для визуализации предоставлялась компонентой GraphicsClient, исполняющейся в адресном пространстве управляющего процесса на одном из метаузлов.

Проводились следующие вычислительные эксперименты:

- Исследования средней скорости движения АТС по многополосной дороге при различном составе транспортных средств (изменялась доля грузовых автомобилей в общем потоке). Результаты расчетов показали наличие фазовых переходов при увеличении интенсивности входящего потока, что согласовывается с эмпирической теорией трех фаз Кернера. Результаты исследования опубликованы в [20].
- Нахождения оптимальных фаз светофора, управляющего перекрестками. Для валидации результатов были выбраны перекрестки, рассмотренные в других работах [18]. Полученные результаты были проверены на устойчивость решения при малых изменениях входящих потоков. Результаты исследования опубликованы в [20].
- Определения места и длины локального расширения на конкретном перекрестке.

Сравнение результатов расчета интенсивности оптимального потока СРТ (Cars Per Time) для конкретного перекрестка с использованием аналитической и имитационной моделей приведены в табл. 4, 5. Результаты коррелируют между собой.

Таблица 4

Результаты, полученные аналитически с помощью аппарата систем массового обслуживания

Фаза 1, сек	Фаза 2, сек	Фаза 3, сек	Фаза 4, сек	СРТ
35	61.5	38.4	32.5	0.741

Таблица 5

Результаты, полученные численным микромоделированием

Фаза 1, сек	Фаза 2, сек	Фаза 3, сек	Фаза 4, сек	СРТ
60	30	45	30	0.737
45	30	30	30	0.737
30	75	45	30	0.737
...	...	...	...	...
45	30	30	90	0.566
30	30	30	90	0.560

Выводы

В работе рассмотрены вопросы построения модуля имитационного моделирования транспортных процессов в составе сетевой компьютерной лаборатории, его архитектура и методическое обеспечение вычислительной процедуры при решении типовых транспортных задач определения задержек автомобилей на управляемом перекрестке сложной структуры. Проведена оценка возможности применения методов теории систем массового обслуживания, получены аналитические оценки параметров оптимального и устойчивого решения для регулируемых перекрестков. Применена расчетная схема Трайбера, которая адаптирована для случаев движения автомобилей по многополосным дорогам и управляемым перекресткам.

Представлены результаты апробации модуля на вычислительном комплексе кластерного типа. Проведен сравнительный анализ результатов решения типовых задач в серии вычислительных экспериментов.

Полученные результаты могут быть рекомендованы для внедрения в пакеты прикладных программ транспортного моделирования.

Литература

1. Гасников А.В., Кленов С.Л., Нурминский Е.А. и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. – М.: МЦНМО, 2013.- 427 с.
2. Городецкий В.И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы применения. // Новости искусственного интеллекта. 1996. №1, С.44-59.
3. Нечаев Ю.И., Осипов В.П. Концептуальный базис создания интегрированного вычислительного комплекса поддержки принятия решений. //Нейрокомпьютеры: разработка, применение. № 2, 2011, С. 4- 18.

4. Нейрокомпьютеры в интеллектуальных технологиях XXI века. Монография / Под общей редакцией Ю.И. Нечаева – М.: Радиотехника, 2012. 352 с.
5. Васильев А.Н., Осипов В.П. Концепция и принципы рациональной схемы прикладного моделирования. //Нейрокомпьютеры: разработка, применение. № 2, 2011, С. 29-37.
6. Нечаев Ю.И., Лютин А.В. Мультиагентные технологии в сложных адаптивных системах искусственного интеллекта // Сборник докладов XIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям SCM-2011. СПб. 2011. т.2, С.64 – 68.
7. Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. – СПб: Арт-Экспресс, 2011.
8. Системы искусственного интеллекта в интеллектуальных технологиях XXI века. – СПбг: Арт-Экспресс, 2011.
9. Хартман К., Лецкий Э., Шеффер В и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977.
- 10.Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2003. №11, С.3 – 46.
- 11.Швецов В.И. Алгоритмы распределения транспортных потоков // Автоматика и телемеханика. 2009. №10, С.148 – 157.
- 12.Kesting A., Treiber M. Calibrating car-following models by using trajectory data:methodological study // Transportation Research Record. — 2008. — Vol. 2088. — P. 148–156.
- 13.Shifan Y., Ben-Akiva M. A practical policy sensitive activity-based model // 11th International conference on travel behaviour research. – Kyoto, 2006.
- 14.Cremer M., May A. D. An extended traffic flow model for inner urban freeways. — 1987.
- 15.Nagel K., Schreckenberg M. A cellular automaton model for freeway traffic // Journal de physique I. — 1992. — Vol. 2, no. 12. — P. 2221–2229.
- 16.Kesting A., Treiber M., Helbing D. General lane-changing model mobil for car-following models // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2007. — Vol. 1999, no. 1. — P. 86–94.
- 17.Kesting A., Treiber M., Helbing D. Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity // Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2010. — Vol. 368, no. 1928. — P. 4585–4605.
- 18.Моделирование многополосного движения автотранспорта на основе теории клеточных автоматов. / М. А. Трапезникова, И. Р. Фурманов, Н. Г. Чурбанова, Р. Липп // Математическое моделирование. — 2011. — Т. 23, № 6. — С. 133–146.
- 19.Бабичева Т.С. Методы теории массового обслуживания при исследовании и оптимизации движения на управляемых перекрёстках// Труды МФТИ. — 2015. — Т. 7, № 2. — С. 119–130.

20. Babicheva T.S., Babichev D.S. Numerical methods for modeling of traffic flows at research and optimization of traffic on the signal-controlled road intersections// *Procedia Computer Science 3rd International Conference on Information Technology and Quantitative Management*. — 2015. — Vol. 55. — P. 461–468.
21. Babicheva T.S. The use of queuing theory at research and optimization of traffic on the signal-controlled road intersections// *3rd International Conference on Information Technology and Quantitative Management*. — 2015. — Vol. 55. — P. 469–478.
22. Обидина Т.С. Исследование задержек, возникающих при пересечении перекрестка, с точки зрения теории массового обслуживания// *Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук. Часть VII Управление и прикладная математика: Труды 56-й научной конференции МФТИ/М.-Долгопрудный, 2013*. — С. 82-83.

Оглавление

Введение	3
Среда имитационного моделирования сетевой компьютерной лаборатории.....	4
Общая характеристика имитационной модели и алгоритмов реализации типовых задач.....	8
Микромодель движения АТС	9
Сравнение моделей, дискретизированных по времени, (Трайбера) и моделей клеточных автоматов (Нагеля-Шрекенберга).....	14
Обобщение модели разумного водителя Трайбера на многополосные дороги и сложные перекрёстки	15
Выводы	25
Литература	25