

С. В. Иванов, К. В. Князьков, Т. Н. Чуров, А. В. Духанов,
А. В. Бухановский

Моделирование и оптимизация движения городского общественного транспорта в среде облачных вычислений CLAVIRE

АННОТАЦИЯ. Представлены теоретические основы и реализующий их высокопроизводительный программный комплекс для оперативного прогноза и оптимизации процессов движения городского транспорта на основе облачной платформы CLAVIRE. Комплекс обеспечивает расчет корреспонденций на графе дорожной сети, мультиагентное моделирование городского трафика, а также решение задач оптимизации маршрутов общественного транспорта с использованием динамических облачных ресурсов.

Ключевые слова и фразы: виртуальное общество, корреспонденции, мультиагентное моделирование, экстренные вычисления, транспортная сеть.

Введение

Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов требует создания интегрированных систем управления нового поколения, позволяющих определять оптимальные режимы движения общественного транспорта с учетом изменчивости дорожной обстановки, получаемой в ходе оперативного прогноза с использованием современных математических моделей с детализацией до уровня отдельных транспортных средств [1]. В такой постановке задача моделирования и оптимизации транспортных потоков в условиях современного города является крайне ресурсоемкой, что требует применения технологий высокопроизводительных вычислений. Однако использование для этих целей выделенных суперкомпьютерных систем или ресурсов распределенных сред неэффективно в силу изменчивости дорожной обстановки, обусловленной много-

масштабной (суточной, недельной, годовой) ритмикой количества транспортных средств и маршрутов их движения в городе. Потому это требует применения специального класса вычислительных технологий – экстренных вычислений (Urgent Computing, UC) [2]. Они позволяют строить динамически конфигурируемые среды распределенных вычислений, гибко изменяя число облачных вычислительных ресурсов в зависимости от вычислительной нагрузки. В данной статье анонсируется облачный высокопроизводительный программный комплекс для оперативного прогноза и оптимизации движения общественного транспорта в Санкт-Петербурге, функционирующий в рамках концепции UC.

1. Принципы моделирования движения транспорта

Для поддержки принятия решений по управлению движением общественного транспорта используется модельный подход, основанный на использовании модели оперативного прогноза транспортной нагрузки, функционирующей в режиме 24x7, с регулярным усвоением данных о реальной ситуации, измеряемых в реперных точках транспортной сети (например, наиболее нагруженных перекрестках). Построение такой модели требует решения трех взаимосвязанных задач: (а) определение характеристик среды – транспортной сети, в которой происходит движение, (б) расчет характеристик движения транспортных средств, пешеходов и пассажиров, и (в) оптимизация условий движения отдельных категорий (или даже единиц) средств общественного транспорта. Задача определения характеристик среды решается взаимосвязанными моделями виртуального общества и движения транспорта, и пассажиров. Модель виртуального общества [3] опирается на статистические данные о населенности территорий города с учетом мест проживания владельцев личных автомобилей, расположений предприятий, автопарков, депо общественного транспорта, и пр. Она позволяет строить сеть корреспонденций, связывающую отдельные объекты в городе. Характеристики данной сети зависят от времени суток, недели и года, и описываются в виде модели полипериодиче-

ски-коррелированного случайного процесса. Параметры модели калибруются на основе данных текущих измерений интенсивности транспортных потоков в реперных точках города, что и определяет ее прогностический потенциал. На рисунке 1 приведены распределения характерных параметров суточной ритмики виртуального общества по данным для Санкт-Петербурга – времени выезда личных транспортных средств (из дома, с работы), а также расчетной нагрузки на городскую транспортную сеть.

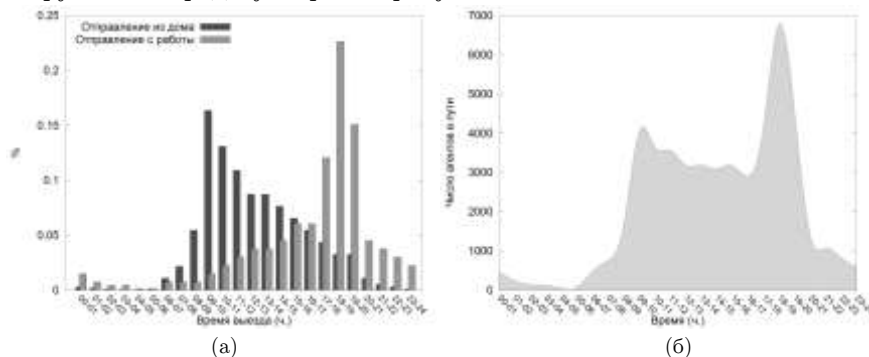


Рис. 1 Суточная ритмика в модели корреспонденций: (а) распределение времени начала маршрута (выезда), (б) распределение числа агентов в пути.

Для воспроизведения движения транспортных агентов по графу дорожной сети на основе системы маршрутов, задаваемых моделью корреспонденций, используется мультиагентная модель движения транспорта и пассажиров. Она использует уже построенную сеть корреспонденций, воспроизводя на ней движение отдельных транспортных средств. При этом учитываются характеристики агента – транспортного средства (легковой автомобиль, грузовик, автобус, и пр.), светофоры, дорожные знаки, а также различия в стилях вождения внутри одного класса транспортных средств. Перемещение пассажиров учитывается косвенно, через количество людей, высадившихся или отправившихся с остановок общественного транспорта. Основой таких моделей являются наборы правил, описывающих движение агентов в различных ситуаци-

ях, в частности, модели движения в потоке, перестроения и прохождения регулируемых и нерегулируемых перекрестков [4].

В совокупности использование модели корреспонденций и движения позволяет делать оперативный прогноз дорожной обстановки на 3-6 часов (в зависимости от обстановки) с возможностью оценки интенсивности транспортного потока в произвольной точке дорожной сети. Для решения задачи усвоения данных измерения в модель применяется обобщенный фильтр Калмана, который позволяет корректировать количество агентов в модели по различным районам города. Данные прогнозов используются для решения задачи оптимизации транспортных маршрутов, например, общественного транспорта или транспорта специального назначения. В зависимости от постановки, такая задача может решаться на основе различных оптимизационных алгоритмов на графах, например, алгоритма Дейкстры. Для учета динамических эффектов, связанных с уточнением прогноза, целесообразно использование эволюционных алгоритмов. Это позволяет в общей постановке охватить задачи: планирования размещения новых остановочных пунктов, поиска кратчайшего пути в условиях изменяющегося трафика, и планирование эффективной перевозки пассажиров.

2. Архитектура программного комплекса

Принципы моделирования движения транспорта реализованы в высокопроизводительном программном комплексе (ВПК), функционирующем в среде облачных вычислений. Он обеспечивает расчет объемов и построение модели корреспонденций на городской дорожной сети, мультиагентное моделирование движения городского транспорта на дорожном графе с учетом основных классов транспортных средств (включая объекты городского пассажирского транспорта), а также решение задач оптимизации движения городского пассажирского транспорта в условиях изменяющегося трафика.

На рисунке 2 представлена схема функционирования ВПК, реализующая принцип «прогноз – моделирование – оптимизация». Инициализация процесса прогнозирования осуществляется данными о корреспонденциях, полученными модели загрузки транспортной сети, которая экстраполирует данные о количестве агентов на 3-6 часов вперед в соответствии с вероятностными характеристиками суточной и недельной ритмики [5]. Затем вырабатывается прогноз транспортной обстановки, т.е. выполняется мультиагентное моделирование по прогнозной модели корреспонденций с учетом изменчивости числа агентов. После выработки прогноза производится анализ, который определяет наличие ситуаций, требующих принятия управленческих решений. Если такие ситуации в прогнозе присутствуют, запускается блок расчета планов управления (например, выбора и обоснования маршрутов), в результате формируется оптимальный план движения заданного транспортного средства или системы средств городского общественного транспорта.



Рис. 2 Схема функционирования высокопроизводительного программного комплекса

Блоки моделирования виртуального общества и перемещения транспорта и пассажиров допускают параллельное исполнение: при каждом прогнозе выполняется динамическое зонирование сети корреспонденций и выделение облачных ресурсов таким образом, чтобы обеспечить выполнение расчетов в заданный временной интервал (10-30 минут) при переменном количестве агентов в модели. Это обеспечивается путем применения облачной платформы CLAVIRE [6] в режиме UC, реализуемом на основе технологии IWF – интерактивных потоков работ [7]. Технология IWF позволяет эффективно организовывать обмен данными между приложениями, функционирующими в облаке, тем самым обеспечивая перераспределение данных между узлами среды при изменении объема корреспонденций в городе, используя для этого специальный планировщик, основанный на параметрических моделях производительности [8]. Если предполагаемое время расчета на ресурсе меньше критического значения, то подсистема исполнения решит данную задачу на одной виртуальной машине с необходимым количеством ядер. В противном случае планировщик может автоматически принять решение о применении схемы внешнего распараллеливания задачи моделирования и распределить процесс на несколько ресурсов, предварительно запустив необходимые виртуальные машины в публичном облаке.

В отличие от задачи моделирования, задача поиска оптимального маршрута используется спорадически (по мере возникновения потребности); потому для этого привлекаются не динамические облачные ресурсы, а кластерная система, также подключенная к CLAVIRE. При этом функции планирования и распределения вычислительной нагрузки, подготовки и хранения входных данных и результатов расчетов в облаке, поддержки графического интерфейса пользователя и визуализации результатов реализуются средствами облачной платформы CLAVIRE через стандартный браузер, что определяет доступность сервисов моделирования и оптимизации маршрутов, в том числе, посредством мобильных устройств.

3. Масштабируемость, реактивность и экономическая эффективность вычислений

ВПК обеспечивает одновременное моделирование до 500 тысяч агентов на транспортной сети, что позволяет воспроизводить специфику движения транспорта городов-миллионников. При этом ключевой особенностью является возможность масштабирования вычислений в зависимости от числа транспортных агентов и предельного времени на выработку прогноза. Для проведения экспериментальных исследований масштабируемости ВПК был осуществлен последовательный запуск процессов моделирования для различного числа транспортных агентов и на различном числе вычислительных ресурсов в режиме поддержания постоянной загрузки транспортной сети. Это обеспечивалось путем подготовки входных данных для генерации агентов с циклическими маршрутами. Все агенты, достигшие конечной точки маршрута, заново инициализировались и добавлялись в расчетный сценарий. На рисунке 3(а) приведены значения параллельного ускорения, полученного для расчетов с различным количеством агентов. Видно, что для небольшого количества агентов (<1000) ускорение меньше единицы, т.е. распараллеливание не дает положительного эффекта. Причиной этого является слишком большое соотношение между временем на пересылку данных и временем вычислений. По той же причине для средних размеров задачи, где количество агентов колеблется от 5 до 50 тысяч, заметного ускорения также не наблюдается. Напротив, при существенном количестве агентов (от 50 тыс.) ускорение близко к линейному.

На рисунке 3(б) приведено отношение модельного времени движения транспортных средств к реальному как характеристика реактивности ВПК. Видно, что, например, для 50 тысяч агентов использование только трех облачных ресурсов обеспечивает соотношение 1:20, т.е. прогноз дорожной обстановки на три часа вперед вырабатывается примерно за 10 минут, что обеспечивает разумную заблаговременность при планировании маршрутов общественного и специального транспорта.

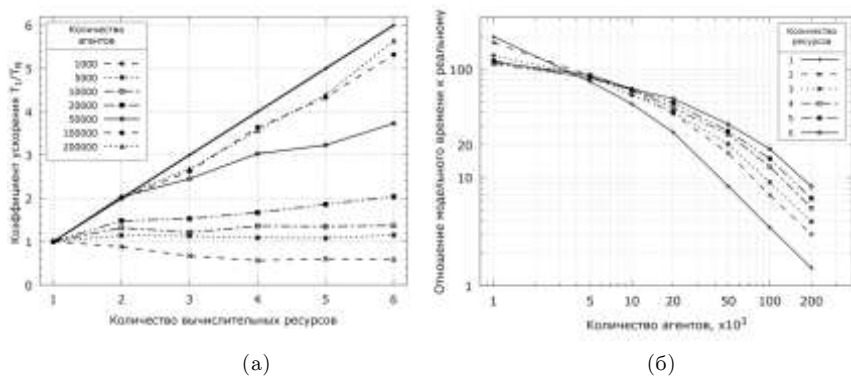


Рис. 3 Характеристики масштабируемости и реактивности: (а) параллельное ускорение, (б) отношение модельного времени к реальному.

Оценка экономической эффективности использования ВПК на основе динамических облачных ресурсов может быть выполнена на основе распределений рисунка 1. В частности, исходя из ограничения времени выработки прогноза в 10 минут и формы распределения загрузки транспортной сети, можно сделать вывод, что ориентация на динамические ресурсы приблизительно в три раза выгоднее, чем аренда облачных ресурсов на условиях подписки. В то же время стоимость арендуемых динамических ресурсов всего на 30% меньше, чем стоимость владения собственным вычислительным кластером с аналогичными характеристиками, что обусловлено непрерывным характером их использования в режиме 24x7.

Заключение

Таким образом, ВПК обеспечивает расчет корреспонденций на графе дорожной сети, мультиагентное моделирование городского трафика и решение задач оптимизации маршрутов городского общественного транспорта. В совокупности это позволяет осуществлять информационную и интеллектуальную поддержку принятия

решений по управлению транспортной ситуаций на крупных городских территориях.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы», ГК № 14.514.11.4066, при поддержке постановления №220 Правительства РФ (договор №11.G34.31.0019, статистические данные для модели виртуального общества).

Список литературы

- [1] Helbing D. Traffic and related self-driven many-particle systems // *Reviews of modern physics*, Vol. 73, Oct. 2001. P. 1068-1141
- [2] *Высокопроизводительные технологии экстренных вычислений для предотвращения угрозы наводнений* / Бухановский А.В., Житников А.Н., Петросян С.Г., Слоот П.М.А. // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2011. Т. 54. № 10. С. 14-20.
- [3] Швецов В.И. *Математическое моделирование транспортных потоков* // *Автоматика и телемеханика*. 2003. №11.
- [4] Casas, Jordi, Jaime L. Ferrer, David Garcia, Josep Perarnau, and Alex Torday. "Traffic simulation with aimsun." In *Fundamentals of Traffic Simulation*, pp. 173-232. Springer New York, 2010.
- [5] Бухановский А.В., Иванов Н.Е, Рожков В.А. *Вероятностные модели и экстремумы годовой ритмики*. Навигация и гидрография, 1999, № 9, с. 57-72.
- [6] *CLAVIRE: e-Science infrastructure for data-driven computing* / Knyazkov K.V., Kovalchuk S.V., Tchurov T.N., Maryin S.V., Boukhanovsky A.V. // *Journal of Computational Science*. 2012. Vol. 3. № 6. P. 504-510.
- [7] Князьков К.В., Ковальчук С.В., Бухановский А.В. *Интерактивные композитные приложения: технология для разработки информационно-измерительных и управляющих систем в распределенных средах* // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. – 2012. – №11. – С. 40–46
- [8] Kovalchuk S.V. [et al.] *Deadline-Driven Resource Management within Urgent Computing Cyberinfrastructure* // *Procedia Computer Science*. Vol. 18. Proceedings of the International Conference on Computational Science. ICCS 2013. 2013. pp. 2203-2212.

Об авторах:



Сергей Владимирович Иванов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ Научно-исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (НИИ ИТМО).

e-mail: sergei.v.ivanov@gmail.com



Князьков Константин Валерьевич

Кандидат технических наук, младший научный сотрудник НИИ НКТ НИУ ИТМО.

e-mail: constantinvk@gmail.com



Духанов Алексей Валентинович

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник НИИ НКТ НИУ ИТМО.

e-mail: dukhanov@niuitmo.ru



Бухановский Александр Валерьевич

Доктор технических наук, директор НИИ НКТ НИУ ИТМО, заведующий кафедрой Высокопроизводительных вычислений НИУ ИТМО.

e-mail: avb_mail@mail.ru



Чуров Тимофей Николаевич

Аспирант, младший научный сотрудник НИИ НКТ
НИУ ИТМО.

e-mail: tchurovtim@gmail.com

Образец ссылки на публикацию:

С. В. Иванов, К. В. Князьков, Т. Н. Чуров, А. В. Духанов, А. В. Бухановский. *Моделирование и оптимизация движения городского общественного транспорта в среде облачных вычислений CLAVIRE* // Программные системы: теория и приложения: электрон. научн. журн. 2013. Т. 4, № 3(17), с. ??-??.

URL: <http://psta.pstiras.ru/read/???>

S.V. Ivanov, K. V. Knyazkov, T.N. Churov, A.V. Dukhanov, A.V. Boukhanovsky *Modelng and optimization of city public transport in the CLAVIRE cloud computing environment.*

ABSTRACT. The high performance software system for forecasting and optimization of city transport's dynamics is presented. The solution is based on the CLAVIRE cloud computing platform and provides: a capability to compute transport demand, multi agent modeling of city transport dynamics, optimization of public transport routes and timetables.

Key Words and Phrases: virtual society, multi agent modeling, agent-based simulation, urgent computing, public transport, transport network.