

Моделирование систем обслуживания пассажиров на транспортных объектах



Василий КУХТА

Vasily B. KUNTA

В работе рассмотрена структура моделей, основанных на многоагентном подходе и положениях абстрактной теории транспортных процессов и систем, предназначенных для имитации систем обслуживания пассажиров и очередей на транспортных объектах. Описаны алгоритмы поиска маршрута движения и взаимодействия моделируемых пассажиров и сервисов. Определены параметры сходимости и устойчивости транспортных процессов на объектах железнодорожной инфраструктуры при использовании каждого типа систем обслуживания. Предложены меры, повышающие качество и скорости обслуживания пассажиров в системе транспортных услуг.

Ключевые слова: транспорт, железная дорога, теория транспортных процессов и систем, многоагентный подход, модели систем обслуживания, пассажиропотоки, устойчивость процессов.

Кухта Василий Борисович — аспирант кафедры «Интеллектуальные транспортные системы» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Увеличение интенсивности и плотности пассажиропотоков на железнодорожных вокзалах и станциях, а также необходимость повышения конкурентоспособности и комфортности оказываемых транспортных услуг требуют оптимизации использования внутреннего пространства объектов транспортной инфраструктуры. Для анализа оптимизационных организационно-планировочных решений разработана программная система имитационного моделирования процессов и ситуаций на транспортных объектах. В данном случае речь пойдет о таком важном аспекте анализа, как моделирование очередей и порядка обслуживания пассажиров.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС СИСТЕМЫ

В принятом варианте все пешеходы и системы обслуживания представлены интеллектуальными компьютерными агентами.

Под интеллектуальным компьютерным агентом понимается некая программная сущность, обладающая активностью, автономным поведением, готовая принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать со сре-

дой и другими агентами, а также самостоятельно изменяться. Набор субъектов подобного типа составляет мультиагентную систему [4].

Имитационное моделирование, основанное на агентном подходе, позволяет исследовать поведение децентрализованных агентов и то, как оно определяет поведение всей системы в целом, а также оценивать самоорганизацию отдельных агентов.

Агенты, моделирующие транспортные объекты, реализуют логику поведения, которая опирается на положения абстрактной теории транспортных процессов и систем [1, 2, 3]. Согласно данной теории, вся пространственная область моделирования поделена на прямоугольные ячейки размером 50х50 см, а процесс передвижения объектов управляется формализованными транспортными операторами, составленными из ряда алгебраизованных выражений вида:

$$(V_i/q_j) YD (V_i/q_k). \quad (1)$$

Здесь V_i обозначает управляемый транспортный объект; Y — один из символов алфавита состояния находящейся по ходу движения объекта ячейки пространства или внешнего воздействия; символ D описывает реакцию транспортного объекта на ситуацию, описываемую символом Y . Символы q_j и q_k определяют состояния объекта до и после наступления реакции D на ситуацию Y .

Сам транспортный процесс представляется набором последовательных дислокаций — состояний и положений объектов на каждом такте алгоритма модели [1, 2, 3].

МЕТОД ПОИСКА МАРШРУТОВ

Для поиска маршрута пешеходами в насыщенной препятствиями среде моделирования используется метод статических полей потенциалов. Суть метода состоит в проставлении значений дистанции с учётом обхода препятствий в каждой ячейке дискретного пространства до часто используемых точек назначения перемещения пешеходов (например, билетных касс), в соответствующих которым ячейках значение дистанции равно нулю. При перемещении по размеченному полю потенциалов объект оценивает эти значения во всех доступных для перемещения ячеек

соседства и производит движение в направлении ячейки с наименьшим значением дистанции до цели. Если наиболее предпочтительная ячейка занята другим объектом, то пешеход переходит в другую ячейку из соседства, где значение дистанции до цели меньше, чем это значение в текущем местоположении. Если же все ячейки, которые могут быть выбраны в качестве цели движения, заняты, неизбежным становится ожидание их освобождения [6].

Модель может содержать несколько полей потенциалов, каждое из которых ведёт к своей цели — билетным кассам, выходу в город или на платформы. В этом случае при необходимости последовательного посещения нескольких целей для транспортного объекта генерируется список индексов полей потенциалов, чтобы обеспечить потребность их обойти. При достижении точки назначения одного поля (например, билетной кассы) объект переходит на следующее поле (ведущее, допустим, к выходу на платформу) и продолжает движение. В точке назначения последнего поля объект удаляется из контекста модели [6].

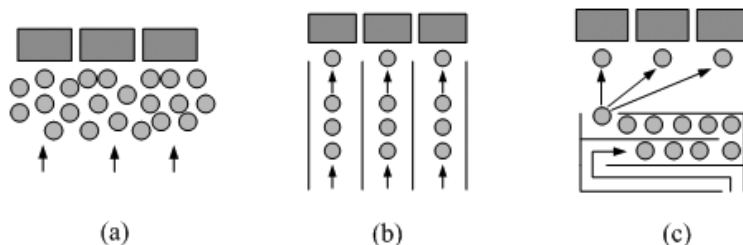
МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ

Пешеходы в модели перемещаются в гибридной дискретно-непрерывной пространственной проекции, где у каждого объекта есть два набора координат — целочисленные координаты занимаемой ячейки в дискретном пространстве и координаты в формате чисел с плавающей точкой, обозначающие положение в непрерывной проекции. При необходимости перейти в какую-либо ячейку — находящуюся в непосредственном соседстве или же отдалённую — рассчитывается угол между центром предпочтительной ячейки и координатами объекта в непрерывном пространстве, после чего производится движение под вычисленным углом на расстояние, которое может быть пройдено за один такт дискретного времени, предусмотренного моделью. Новые координаты в непрерывном пространстве округляются до целого, и полученные округлённые значения становятся обновлёнными координатами транспортного объекта в дискретном пространстве.

Введение такой гибридной пространственной модели позволяет моделировать осо-



Рис. 1. Типы очередей к системам обслуживания.



бенности движения пешеходов в очередях, включая занятие любого свободного пространства между стоящими объектами. При ожидании в очереди пешеход на каждом такте модели оценивает расстояние между своими координатами в непрерывном пространстве и координатами стоящего впереди объекта. Если полученное расстояние меньше сумм радиусов пешеходов, то выполняется движение вперед на разницу между установленным расстоянием и суммой радиусов.

ТИПЫ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Для обоснования метода моделирования очередей в разработанной системе нужна классификация систем обслуживания по типу используемых очередей.

Рассмотрим системы обслуживания, состоящие из нескольких параллельно функционирующих сервисных объектов — например, ряда билетных касс или автоматических терминалов.

Первый тип представляет собой N неупорядоченных очередей с N входами к N сервисным объектам, его иллюстрирует на рис. 1а.

Объекты, желающие получить доступ к сервисам, имеют соревновательное поведение и достигают результата по мере появления свободного пространства по направлению движения. Между очередями нет четких границ, и объекты легко могут переходить из одной очереди к другой [7, 8].

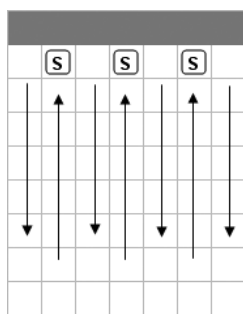


Рис. 2. Структура модели первого типа.

Второй тип систем обслуживания состоит из N упорядоченных и разграниченных между собой очередей с N входами к N сервисам. Объекты, задачей которых является доступ к сервису, расположены в очереди типа FIFO. Пример такой системы демонстрирует рис. 1б.

Третий тип систем обслуживания содержит одну упорядоченную очередь с одним входом, ведущую к N сервисам. Объект после достижения конца очереди может обратиться к любому свободному сервису. Этот тип системы показан на рис. 1в.

МОДЕЛЬ СИСТЕМ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Модель для систем обслуживания первого типа выглядит достаточно тривиальной, её структура представлена на рис. 2. Она содержит ряд из N сервисов S , которые расположены на ячейках, являющихся точками назначения соответствующего поля потенциалов. Сервисы характеризуются своим состоянием (свободным или занятым), а также минимальным и максимальным временем возможного обслуживания потребителей. Пешеходы, перемещаясь по полю с использованием описанного выше алгоритма, соревнуются друг с другом за доступ к ближайшему сервису. При достижении цели пешеход ожидает определённое количество тактов модели, назначенное ему сервисом, а сам сервис переводится в занятое состояние. После завершения взаимодействия с сервисом пешеход переходит на другое поле потенциалов, ведущее к следующей цели.

Составим формализованный оператор для управления транспортным процессом в данной ситуации. Для этого введём ряд функций.

Логическая функция $B(X \pm \alpha)$ используется при определении доступности для занятия зоны X или отстоящей от неё относительно транспортного объекта на α градусов зоны в соседстве объекта. Функция FC

возвращает ячейку из соседства с наименьшим значением дистанции до цели. Операция $ST(X, V)$ производит движение в сторону ячейки X на расстояние V , длящееся в течение одного такта. Функция $EX(T)$ заставляет объект ожидать в течение T тактов модели. Функция $F(X \pm \alpha)$ ориентирует объект на ячейку X или отстоящую от неё относительно объекта на α градусов зоны в соседстве. Метод $INC(SFF)$ переводит объект на следующее поле потенциалов. Поясним некоторые параметры функций: T_s – время ожидания, назначенное сервисом; N – расстояние, которое может быть пройдено объектом за один такт модели. $(V_i/q_0) S INC(SFF) (V_i/q_5); (V_i/q_5) S EX(T_s) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_0) \rightarrow B(FC) F(FC+45) (V_i/q_1);$
 $(V_i/q_1) B(FC+45) ST(FC+45, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_1) \rightarrow B(FC+45) F(FC-45) (V_i/q_2);$ (2)
 $(V_i/q_2) B(FC-45) ST(FC-45, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_2) \rightarrow B(FC-45) F(FC+90) (V_i/q_3); (V_i/q_3)$
 $B(FC+90) ST(FC+90, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_3) \rightarrow B(FC+90) F(FC-90) (V_i/q_4); (V_i/q_4)$
 $B(FC-90) ST(FC-90, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_4) \rightarrow B(FC-90) EX(1) (V_i/q_0).$

Рассмотрим теперь структуру модели для симуляции второго типа систем обслуживания, состоящих из N упорядоченных и разграниченных между собой очередей с N входами к N сервисам (рис. 3). Очередь представлена пассивным объектом, характеризующимся точкой входа в очередь X и количеством пешеходов в ней. Несколько очередей, ведущих к группе рядом расположенных однотипных сервисов (например, к ряду билетных касс), объединяются в блок объектов. Штриховкой на рисунке показаны ячейки, недоступные для занятия на данном поле потенциалов, но которые могут быть доступны на другом поле.

При достижении пешеходом точек назначения он выбирает очередь с наименьшим количеством других пешеходов и движется по прямой к её входу X , где по полю потенциалов в составе очереди перемещается к сервису S . Очереди на поле потенциалов, ведущих к сервисам, отгорожены друг от друга виртуально (рис. 3а). После освобождения сервиса пешеход переходит на соседнее поле потенциалов и удаляется от касс, причём на этом поле ячейки, где могут стоять в очереди другие пешеходы, недоступны для занятия (рис. 3б).

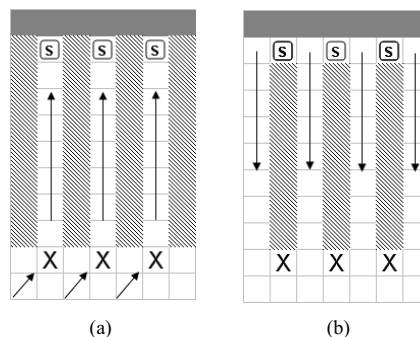


Рис. 3. Структура модели второго типа.

Составим формализованный оператор для управления движением объектов в данном случае. Он будет частично совпадать с оператором, описанным ранее, однако добавятся некоторые дополнительные методы. Функция $D(X, D)$ возвращает дистанцию между ячейками X и D . Метод CH выбирает очередь с наименьшим количеством человек в ней. Функция $rad(V_i)$ возвращает радиус транспортного объекта V_i , а функция $GC(W)$ – ближайшую ячейку, которая должна быть занята для достижения по прямой отдалённой зоны W .

$(V_i/q_0) D(V_i, S) = \lambda CH(V_i/q_5); (V_i/q_6) S INC(SFF) (V_i/q_7);$
 $(V_i/q_7) S EX(T_s) (V_i/q_0); (V_i/q_0) B(FC) ST(FC, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_0) \rightarrow B(FC) F(FC+45) (V_i/q_1);$
 $(V_i/q_1) B(FC+45) ST(FC+45, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_1) \rightarrow B(FC+45) F(FC-45) (V_i/q_2);$ (3)
 $(V_i/q_2) B(FC-45) ST(FC-45, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_2) \rightarrow B(FC-45) F(FC+90) (V_i/q_3); (V_i/q_3)$
 $B(FC+90) ST(FC+90, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_3) \rightarrow B(FC+90) F(FC-90) (V_i/q_4); (V_i/q_4)$
 $B(FC-90) ST(FC-90, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_4) \rightarrow B(FC-90) EX(1) (V_i/q_0); (V_i/q_5) B$
 $(GC(X)) ST(X, T) (V_i/q_5);$
 $(V_i/q_5) \rightarrow B(GC(X)) EX(1) (V_i/q_5); (V_i/q_5) X$
 $ST(X, T) (V_i/q_6);$
 $(V_i/q_6) B(GC(S)) ST(S, T) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_6) (GC(S) = V_i \& D(V_i, V_j) = (rad(V_i) + rad(V_j))) EX(1) (V_i/q_6);$
 $(V_i/q_6) (GC(S) = V_i \& D(V_i, V_j) > (rad(V_i) + rad(V_j))) ST(S, D(V_i, V_j) - (rad(V_i) + rad(V_j))) (V_i/q_6).$

Структура модели для симуляции третьего типа систем обслуживания, состоящих из одной очереди с одним входом к N сервисам, представлена на рис. 4. Параметры и алгоритм перемещения пешеходов в такой модели аналогичны свойствам



модели систем обслуживания второго типа, за исключением наличия маршрутизатора R. Маршрутизатор указывает направление на свободный сервис проходящему через него транспортному объекту или задерживает его в случае занятости всех относящихся к маршрутизатору сервисов до освобождения одного из них.

Транспортный оператор для управления движения объектов в этом варианте будет содержать дополнительную логическую функцию R, которая показывает состояние маршрутизатора очереди. Итоговый оператор будет выглядеть следующим образом: $(V_i/q_0) D (V_i, S) = \lambda CH (V_i/q_6); (V_i/q_7) S INC (SFF) (V_i/q_8);$
 $(V_i/q_8) S EX (Ts) (V_i/q_0); (V_i/q_0) -R EX (1) (V_i/q_0); (V_i/q_0) R EX (0) (V_i/q_7);$
 $(V_i/q_7) B (GC (S)) ST (S) (V_i/q_7); (V_i/q_7) -B (GC (S)) EX (1) (V_i/q_7);$
 $(V_i/q_7) S EX (Ts) (V_i/q_0); (V_i/q_0) B (FC) ST (FC, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_0) -B (FC) F (FC+45) (V_i/q_1);$
 $(V_i/q_1) B (FC+45) ST (FC+45, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_1) -B (FC+45) F (FC-45) (V_i/q_2); (4)$
 $(V_i/q_2) B (FC-45) ST (FC-45, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_2) -B (FC-45) F (FC+90) (V_i/q_3); (V_i/q_3) B (FC+90) ST (FC+90, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_3) -B (FC+90) F (FC-90) (V_i/q_4); (V_i/q_4) B (FC-90) ST (FC-90, N) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_4) -B (FC-90) F (FC) (V_i/q_5);$
 $(V_i/q_5) (FC=V_j \& D (V_i, V_j) = (rad (V_i) + rad (V_j))) EX (1) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_5) (FC=V_j \& D (V_i, V_j) > (rad (V_i) + rad (V_j))) ST (FC, D (V_i, V_j) - (rad (V_i) + rad (V_j))) (V_i/q_0);$
 $(V_i/q_6) B (GC (X)) ST (X, T) (V_i/q_6);$
 $(V_i/q_6) -B (GC (X)) EX (1) (V_i/q_6); (V_i/q_6) X ST (X, T) (V_i/q_0).$

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

Рассмотрим применение описанных моделей систем обслуживания для ими-

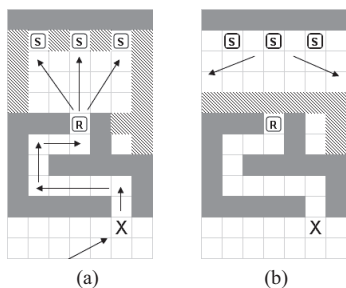


Рис. 4. Структура модели третьего типа.

тации реального транспортного процесса и его анализа с точки зрения сходимости и устойчивости.

Устойчивость характеризуется малой степенью изменения протекающих процессов при меняющихся входных данных или динамических возмущениях транспортных параметров [1].

Сходимость транспортного процесса означает возможность достижения требуемой конечной дислокации транспортного объекта за конечное число тактов модели без появления конфликтных ситуаций. Причем процесс, обладающий свойством сходимости, обычно остается и устойчивым [1].

С помощью системы, созданной с использованием технологий платформы Java и среды агентного моделирования Repast Symphony 2.0, последовательно смоделировано три рассмотренных типа систем обслуживания на примере кассового зала крупного железнодорожного узла, содержащего 12 касс и обладающего входным потоком пассажиров интенсивностью 90 чел./мин (5400 чел./ч).

Транспортный процесс, где пассажиры обладают соревновательным поведением и пытаются получить доступ к ближайшему сервису, не является сходящимся: входящий пассажиропоток блокирует пути отхода от касс для пассажиров, купивших билет, а те, в свою очередь, не оставляют места для желающих получить доступ к сервису пассажиров.

Второй тип систем обслуживания позволяет обеспечить требуемую сходимость транспортного процесса. Однако он может стать неустойчивым в случае задержек или выхода из строя одного или нескольких сервисов, так как каждый из них имеет свою ведущую к нему очередь. Пассажиры, находящиеся в очереди к сервисам, у которых задержки в функционировании, получают дополнительное время ожидания доступа к услугам и будут испытывать дискомфорт.

Модель третьего типа систем обслуживания дает возможность сформировать транспортный процесс, обладающий требуемым свойством сходимости и высокой степенью устойчивости. Если какой-либо сервис выйдет из строя, пассажиры будут перенаправляться в соседние

сервисы без существенных временных потерь. Однако несмотря на достигнутую высокую степень устойчивости, такое организационно-планировочное решение не позволяет достичь такой же скорости обслуживания пассажиров, как в случае использования модели второго типа. Это связано с тем, что пассажир должен потерять некоторое количество времени, чтобы принять решение о выборе сервиса и подойти к нему от начала очереди.

Для устранения выявленной особенности можно принять ряд мер: приблизить начало очереди к блоку сервисов или создать дополнительные микроочереди из двух объектов у каждого сервиса, чтобы второй пешеход в этой очереди получил доступ к сервису сразу же после ухода от него купившего билет пассажира.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доенин В. В. Основы абстрактной теории транспортных процессов и систем. — М.: Спутник+, 2011. — 348 с.
2. Доенин В. В. Адаптация транспортных процессов. — М.: Спутник+, 2009. — 219 с.
3. Доенин В. В. Интеллектуальные транспортные потоки. М.: Спутник+, 2007. — 306 с.
4. Macal C. M., North M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. // *Journal of Simulation*, № 4 (3), 2010.
5. Shiwakoti N., Sarvi M., Rose G. Modeling pedestrian behavior under emergency conditions: State-of-the-art and future directions. // *Australasian Transport Research Forum*, 2008.
6. Zhang Q., Baoming H., Dewei L. Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 16, № 5, 2008.
7. Li De Wei, Bao Ming Han. Modeling Queue Service System in Pedestrian Simulation. // *Advanced Materials Research* 187, 2011
8. Yanagisawa, D., Suma Y., Tanaka Y., Tomoeda A., Ohtsuka K., Nishinari K. Methods for Improving Efficiency of Queuing Systems. // *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2011. ●

SIMULATION OF PASSENGER SERVICE SYSTEMS AT RAILWAY STATIONS

Kuhta, Vasily B. — Ph.D. student at the department of intelligent transport systems of Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.

The article studies structure of models, based on multiagent approach, abstract theory of transportation process, and transport systems, destined to simulate passenger service systems at stations and other transport structures. The author describes algorithms of searching for routes of movement and interaction between simulated passengers and services. The article contains some conclusions on parameters of convergence and stability of transport processes at rail structures under different service modes. The practical implementation

is illustrated at example of three simulated types of passenger service in the ticket office (hall of large rail hub station) with 12 ticket desks and entering flow of passengers estimated at 90 pers./min (5400 pers./hour). The models are simulated with the help of JAVA platform and Repast Symphony 2.0 environment. Following the simulation the author suggests approach of implementation of the results of simulation, suggesting measures aimed at quality enhancement and service acceleration for analyzed cases.

Key words: transport, railway, theory of transport process and transportation systems, multiagent approach, service systems models, passenger flow, stability of processes.

REFERENCES

1. Doenin V. V. Fundamentals of abstract theory of transport processes and systems [*Osnovy abstraktnoy teorii transportnykh protsessov i sistem*]. Moscow, Sputnik+ publ., 2011, 348 p.
2. Doenin V. V. Adaptation of transport processes [*Adaptatsiya transportnykh protsessov*]. — Moscow, Sputnik+ publ., 2009, 219 p.
3. Doenin V. V. Intelligent transport flows [*Intellektual'nye transportnye potoki*]. Moscow, Sputnik+ publ., 2007, 306 p.
4. Macal C. M., North M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, № 4 (3), 2010.
5. Shiwakoti N., Sarvi M., Rose G. Modeling pedestrian behavior under emergency conditions: State-of-the-art and future directions. *Australasian Transport Research Forum*, 2008.
6. Zhang Q., Baoming H., Dewei L. Modeling and simulation of passenger alighting and boarding movement in Beijing metro stations. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, 16, № 5, 2008.
7. Li De Wei, Bao Ming Han. Modeling Queue Service System in Pedestrian Simulation. *Advanced Materials Research*, 187, 2011
8. Yanagisawa, D., Suma Y., Tanaka Y., Tomoeda A., Ohtsuka K., Nishinari K. Methods for Improving Efficiency of Queuing Systems. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, 2011.

Координаты автора (contact information): Кухта В.Б. (Kuhta V.B.) vkukhta@mail.ru.

Статья поступила в редакцию / article received 26.01.2013
Принята к публикации / article accepted 19.02.2013

