

Системный анализ и исследование операций

© 2017 г. В.В. ГРИБОВА, д-р техн. наук (gribova@iacp.dvo.ru),
Н.Б. ШАМРАЙ, канд. физ.-мат. наук (shamray@dvo.ru)
(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток),
Л.А. ФЕДОРИЩЕВ, канд. техн. наук
(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНТЕРАКТИВНЫХ ВИРТУАЛЬНЫХ СРЕД¹

Описывается концепция создания облачного сервиса интерактивного моделирования транспортных потоков в развивающейся городской инфраструктуре. Математическая модель прогнозирования загрузки транспортной сети построена в результате синтеза гравитационной модели описания транспортных корреспонденций и мультимодальной задачи потокового равновесия с эластичным спросом. Поиск потокового равновесия сводится к решению вариационного неравенства. 3-мерная визуализация транспортной сети и прилегающей инфраструктуры реализуется по декларативной модели виртуальной среды.

Ключевые слова: транспортное равновесие, эластичный спрос, вариационное неравенство, онтология, облачный сервис, виртуальный мир, 3D-графика.

1. Введение

Успешное развитие города, комфортность проживания, рост благосостояния его обитателей и активность бизнеса во многом зависят от качества функционирования транспортной системы и разумной политики обустройства прилегающей к ней территории. Программы и проекты, разрабатываемые с целью улучшения жизненного пространства города, включают самый широкий спектр действий, направленных на решение как транспортных проблем (строительство новых магистралей, изменение пропускной способности и направлений движения существующих автодорог, создание перехватывающих парковок, запрет на въезд на определенную территорию и т.п.), так и задач планирования и размещения инфраструктурных объектов (строительство/ликвидация жилых массивов, объектов торгово-промышленной, финансово-деловой, культурно-развлекательной, социальной и т.п. сфер деятельности).

Очевидно, что транспортные проблемы и проблемы планирования городской инфраструктуры неотделимы друг от друга. Глобальный характер ме-

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 13-07-12010, № 13-07-00024-а).

роприятий по их решению связан как с внушительными финансовыми затратами, так и с реорганизацией социальной и хозяйственной жизни города, и требует предварительного анализа и оценки эффективности.

Объективным инструментом поддержки управленческих решений при планировании развития транспортной системы и прилегающей инфраструктуры являются математическое моделирование и базирующееся на нем специализированное программное обеспечение (ПО).

Методология описания транспортных потоков имеет полувековую историю, накоплен огромный опыт моделирования законов и принципов движения пользователей улично-дорожной сети (УДС). Современное состояние теории транспортных потоков описано, например, в [1, 2].

Основная ниша рынка ПО моделирования транспортных потоков занята зарубежными разработчиками. К наиболее известным продуктам относятся программные комплексы VISUM/VISSIM, AIMSUN, TRANSIMS. Из отечественных разработок можно выделить систему TransNet. Существующее ПО обладает как достоинствами, так и недостатками. Коммерческое дорогостоящее ПО включает широкий спектр возможностей, сопровождается удобным и наглядным графическим интерфейсом, в том числе 2D и 3D визуализациями, адаптируется под любые структуры УДС и, как следствие, требует больших вычислительных ресурсов, предварительного обучения по установке, сопровождению и использованию. Некоммерческое ПО отличается скудным графическим интерфейсом и различной степенью реализации функциональных возможностей. В настоящее время предлагаемое на рынке ПО не содержит реализаций последних достижений в области математического моделирования транспортных потоков. Более детально с особенностями существующего ПО можно ознакомиться по обзорам [3, 4].

Для прогнозирования автомобильного трафика и определения уровня загруженности УДС используется ПО на основе макроскопических моделей описания транспортных потоков. Традиционно макро моделирование реализуется в четыре этапа: генерация передвижений (trip generation), определение транспортных корреспонденций (trip distribution), расщепление потоков по типам (model split) и распределение потоков по маршрутам (rout assignment) [5]. Для каждого из этапов существуют свои математические модели и методы расчетов. В частности, корреспонденции, как правило, описываются моделями гравитационного типа [6, 7], а распределение потоков по маршрутам осуществляется на основе так называемого принципа пользовательского равновесия (user-equilibrium assignment) [8]. Этапы выполняются последовательно друг за другом, при этом важно учитывать и обратную связь между полученными результатами, что приводит к неоднократному выполнению всех четырех шагов.

Несмотря на то что в современной транспортной науке получено значительное количество результатов, направленных на повышение точности макро моделирования, многие из них так и остались теоретическими достижениями и не имеют практической реализации ни в зарубежном, ни в отечественном ПО. Так, например, реализация модели пользовательского равновесия сводится к интегральному критерию оптимизации [9], что предполагает

выполнение условия симметричности матрицы Якоби для вектор-функции транспортных издержек и ограничивает применение самой модели. Более универсальным подходом к поиску пользовательского равновесия является сведение исходной задачи к эквивалентному вариационному неравенству, что позволяет расширить круг используемых функций [10].

В настоящей статье дано описание создаваемого авторами сервиса интерактивного моделирования транспортных потоков. Основное назначение системы – оперативная оценка загрузки элементов УДС при различных ее модификациях и изменениях в расположении и назначении градостроительных объектов. Прогнозирование транспортных потоков осуществляется на базе математической модели, построенной в результате синтеза гравитационной модели описания матрицы корреспонденций и модели равновесного распределения транспортных потоков. Расчет загрузки УДС сводится к решению вариационного неравенства, что в отличие от традиционно решаемой оптимизационной задачи позволяет использовать более широкий набор функций транспортных издержек. По результатам решения вариационного неравенства одновременно определяются транспортные корреспонденции, расщепление потоков по типам и их распределение по маршрутам, поэтому предлагаемая синтезированная модель объединяет три из четырех этапов макро моделирования транспортных потоков. Визуализация транспортной сети и прилегающей инфраструктуры реализуется на облачной платформе IASaaS [11] с использованием инструментального комплекса Интернет Разработки Виртуальных Интерактивных Сред (ИРВИС), предназначенного для создания интерактивных виртуальных сред [12].

2. Математическое моделирование транспортных потоков

Рассмотрим некоторые из вопросов, возникающих при внесении предложений о развитии транспортной системы и прилегающей к ней инфраструктуры, например как изменится загрузка УДС при модернизации ее элементов (расширение/сужение магистралей, изменение направлений движения, ликвидация дороги, и т.п.) или при вводе в эксплуатацию новых коммуникаций (объездные, дублирующие дороги); какие изменения в транспортной системе повлечет строительство нового жилого района или объекта тяготения потоков (крупные производства, бизнес-центры, социально-культурные, торговые, бытовые объекты и т.п.); улучшится ли транспортная ситуация в случае выноса крупных объектов тяготения за пределы города; как повлияет на загрузку УДС введение ограничений на передвижение (запрет на въезд в определенные зоны, платный проезд). Получение объективных ответов на поставленные вопросы играет ключевую роль при принятии управленческих решений в области эффективного развития городской агломерации. Инструментом для оценки традиционно выступает макро моделирование транспортных потоков [5, 13, 14].

Макроскопические модели рассматривают транспортный поток в целом и позволяют определять уровень загрузки УДС. Процесс моделирования предполагает последовательное решение четырех задач:

- 1) определение спроса на перевозки, т.е. объемов отправок и прибытий;
- 2) расчет транспортных корреспонденций;

3) расщепление корреспонденций по типам (способам и целям передвижений);

4) распределение корреспонденций по маршрутам.

Результаты решения одной задачи являются исходными данными для последующей. Важно учитывать и обратную связь между задачами, что приводит к необходимости повторных расчетов, т.е. моделирование представляет итерационный процесс.

Загруженность транспортной сети определяется по результатам решения четвертой задачи. Наиболее эффективной моделью описания распределения транспортных потоков по маршрутам считается модель пользовательского равновесия [8–10], в основу которой положен эгоистичный поведенческий принцип — пользователи сети независимо друг от друга выбирают маршруты, соответствующие их минимальным транспортным издержкам, при этом равновесием считается ситуация, когда ни один из участников движения не может в одиночку уменьшить свои издержки, изменив маршрут следования, поэтому не имеет мотивации к изменению выбранного пути.

Современная теория транспортного равновесия позволяет заметить поэтапное моделирование транспортных потоков решением одной задачи. В частности, этапы расчета транспортных корреспонденций, расщепления по типам и определения равновесного распределения потоков по сети можно заменить решением так называемой мультимодальной задачи транспортного равновесия с эластичным спросом MNPED (multimodal network equilibrium with elastic demand) [15, 16]. Несомненно, решение MNPED намного сложнее, чем решение каждой из трех задач в отдельности. Однако преимуществом MNPED видится более высокая точность моделирования, поскольку естественно полагать, что объемы корреспонденций зависят от загрузки сети, а загрузка определяется транспортными корреспонденциями, и это взаимное влияние заложено в MNPED. В результате прогнозирование транспортных потоков на базе алгоритмического аппарата MNPED составляет достойную конкуренцию четырехэтапному процессу моделирования, реализованному в большинстве современных программных продуктов.

Транспортную сеть опишем в виде ориентированного графа $\Gamma(\mathcal{N}, \mathcal{L})$, где \mathcal{N} — множество вершин, \mathcal{L} — множество дуг сети. Каждая дуга соответствует реальному участку автодороги без перекрестков. Каждая вершина представляет узел, разделяющий участки дорог. Направление дуги определяет ход следования автотранспорта. Магистралы с двусторонним движением соответственно имеют парные противоположно ориентированные дуги.

При исследовании потокообразующих факторов в множестве вершин \mathcal{N} выделим два подмножества: первое $\mathcal{O} \subseteq \mathcal{N}$ содержит узлы, порождающие потоки; второе $\mathcal{D} \subseteq \mathcal{N}$ содержит узлы, поглощающие потоки.

Потоки в транспортной сети будем различать по типам. Критериями расщепления потоков могут служить следующие факторы: цель передвижения (трудовая миграция, деловые корреспонденции, культурно-бытовые поездки), способ передвижения (частный, общественный, служебный транспорт, пешие передвижения). Множество рассматриваемых типов обозначим через \mathcal{M} .

Ключевой информацией в транспортном планировании являются объемы спроса на перевозки. Количественной характеристикой такого спроса служит матрица корреспонденций, элементы которой представляют объемы передвижений между узлами, порождающими и поглощающими потоки. В свою очередь распределение пользователей сети по корреспонденциям зависит от величины понесенных транспортных издержек. Обозначим через ρ_{ij}^m и u_{ij}^m объем корреспонденции и транспортные издержки для потока типа $m \in \mathcal{M}$ из узла $i \in \mathcal{O}$ в узел $j \in \mathcal{D}$. Пусть заданы функции транспортного спроса:

$$\rho_{ij}^m = \rho_{ij}^m(u), \quad u = (u_{ij}^m : m \in \mathcal{M}, (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}).$$

Матрицу корреспонденций обозначим через $\rho = \rho(u) = (\rho_{ij}^m(u) : m \in \mathcal{M}, (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D})$.

Путем (маршрутом) в сети Γ , соединяющим вершины i и j , назовем последовательность дуг

$$l_1 = (i \rightarrow k_1), l_2 = (k_1 \rightarrow k_2), \dots, l_s(k_{s-1} \rightarrow k_s), l_{s+1} = (k_s \rightarrow j),$$

где $l_1, l_2, \dots, l_{s+1} \in \mathcal{L}$. В маршрутах предполагается отсутствие петель и циклов. Обозначим через P_{ij} множество альтернативных маршрутов, связывающих пару $(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}$.

Перемещаясь между потокообразующими парами, пользователи сети выбирают тот или иной маршрут следования. Обозначим через x_p^m величину потока типа $m \in \mathcal{M}$, идущего по пути $p \in P_{ij}$ для пары $(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}$. Построим вектор $x = (x_p^m : m \in \mathcal{M}, p \in P_{ij}, (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D})$. Во введенных обозначениях пара (x, ρ) определяет загрузку транспортной сети и должна удовлетворять условиям сохранения потока и неотрицательности:

$$(1) \quad (x, \rho) \in X = \left\{ (x, \rho) \geq 0 : \sum_{p \in P_{ij}} x_p^m = \rho_{ij}^m, m \in \mathcal{M}, (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D} \right\}.$$

Преодоление каждого из путей p сопровождается транспортными издержками (время, топливо, деньги, амортизация транспортного средства, экологические издержки, износ дороги и т.п.). Количественная характеристика издержек зависит от интенсивности и плотности движения в сети. Как правило, в моделях рассматриваются временные или финансовые затраты. Обозначим через F_p^m издержки участников потока типа m на проезд по пути p . Поскольку на издержки по одному маршруту может влиять загрузка других путей (естественным примером тому служат пересечения главных и второстепенных дорог, дублирующие дороги и т.д.), т.е. в общем случае F_p представляют собой функции от загрузки всей сети: $F_p^m = F_p^m(x)$.

Во введенных обозначениях равновесное распределение потоков $(\bar{x}, \bar{\rho}) \in X$ (пользовательское равновесие) определяется следующими условиями: для каждого типа $m \in \mathcal{M}$, пары $(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}$ и пути $p \in P_{ij}$ выполнено соотношение

$$(2) \quad F_p^m(\bar{x}) \begin{cases} = \bar{u}_{ij}^m, & \text{если } \bar{x}_p^m > 0, \\ \geq \bar{u}_{ij}^m, & \text{если } \bar{x}_p^m = 0, \end{cases}$$

где \bar{u}_{ij}^m — минимальные издержки для потока типа m и пары (i, j) .

Предположим, что функция транспортного спроса $\rho(u)$ имеет обратную функцию: $u(\rho) = (u_{ij}^m(\rho) : m \in \mathcal{M}, (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D})$. При этом будем полагать, что $u_{ij}^m(\bar{\rho}) = \bar{u}_{ij}^m$. Для пользователя сети функции $u_{ij}^m(\rho)$ представляют меру полезности (disutility function) поездки из i в j : на основании значений u_{ij}^m пользователи примыкают к той или иной корреспонденции, при этом стимул совершать поездку из i в j уменьшается с увеличением значения u_{ij}^m . В свою очередь через балансовые ограничения (1) на значение u_{ij}^m влияет уровень загрузки элементов транспортной сети. Такое взаимное влияние и приводит транспортную систему к равновесному состоянию, при котором ни один из пользователей в одиночку не может улучшить свою меру полезности, изменив тип поездки или вовсе ее отменив.

Нетрудно видеть, что для произвольной допустимой загрузки сети $(x, \rho) \in X$ условия (2) влекут выполнение неравенств

$$(3) \quad F_p^m(\bar{x})(x_p^m - \bar{x}_p^m) - u_{ij}^m(\bar{\rho})(x_p^m - \bar{x}_p^m) \geq 0, \quad m \in \mathcal{M}, \quad (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}, \quad p \in P_{ij}.$$

Для некоторой пары $(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}$ и потока типа $m \in \mathcal{M}$ просуммируем неравенства (3) по всем $p \in P_{ij}$:

$$(4) \quad \begin{aligned} & \sum_{p \in P_{ij}} F_p^m(\bar{x})(x_p^m - \bar{x}_p^m) - u_{ij}^m \sum_{p \in P_{ij}} (x_p^m - \bar{x}_p^m) = \\ & = \sum_{p \in P_{ij}} F_p^m(\bar{x})(x_p^m - \bar{x}_p^m) - u_{ij}^m(\rho_{ij}^m - \bar{\rho}_{ij}^m) \geq 0. \end{aligned}$$

Далее неравенства (4) суммируем для всех потокообразующих пар и типов потоков. Видим, что равновесное распределение потоков $(\bar{x}, \bar{\rho}) \in X$ есть решение вариационного неравенства:

$$(5) \quad \begin{aligned} & \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}} \sum_{p \in P_{ij}} F_p^m(\bar{x})(x_p^m - \bar{x}_p^m) - \\ & - \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}} u_{ij}^m(\bar{\rho})(\rho_{ij}^m - \bar{\rho}_{ij}^m) \geq 0, \quad (x, \rho) \in X. \end{aligned}$$

Верно и обратное: пусть пара $(\bar{x}, \bar{\rho}) \in X$ является решением вариационного неравенства (5) и определяет некоторую допустимую загрузку транспортной сети. Произвольно выберем пару $(k, l) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}$, поток типа $n \in \mathcal{M}$, пусть $q \in P_{kl}$ и построим новую допустимую загрузку (x, ρ) по правилу: $x_p^m = \bar{x}_p^m$ для всех $m \neq n$ и $p \neq q$, $x_q^n \neq \bar{x}_q^n$, при этом $\rho_{ij}^m = \bar{\rho}_{ij}^m$ для всех $(i, j) \neq (k, l)$, $m \neq n$, $\rho_{kl}^n = \bar{\rho}_{kl}^n + x_q^n - \bar{x}_q^n$. Для пары (x, ρ) вариационное неравенство (5) преобразуется к виду

$$(6) \quad (F_q^n(\bar{x}) - u_{kl}^n(\bar{\rho}))(x_q^n - \bar{x}_q^n) \geq 0.$$

Если $\bar{x}_q^n > 0$, то для всех (x, ρ) неравенство (6) выполнено только при $F_q^n(\bar{x}) = u_{kl}^n(\bar{\rho})$. Если $\bar{x}_q^n = 0$, то из (6) следует, что $(F_q^n(\bar{x}) - u_{kl}^n(\bar{\rho})) \geq 0$.

В результате доказано, что поиск равновесного распределения потоков $(\bar{x}, \bar{\rho}) \in X$ эквивалентен решению вариационного неравенства (5), см. [16].

Для завершения процесса моделирования необходимо определить вид функций транспортного спроса $\rho_{ij}^m(u)$ и транспортных издержек $F_p^m(x)$.

Самым распространенным и простым предположением о свойствах функций транспортных издержек по пути является аддитивная зависимость от транспортных издержек по дугам, составляющим данный путь:

$$F_p^m(x) = \sum_{l \in p} f_l^m(x),$$

где $f_l^m(x)$ – транспортные издержки для потока типа m на дуге l , входящей в путь p , при загрузке сети, описываемой вектором x . В общем случае для каждой дуги определяется свой вид функции транспортных издержек. Примеры неаддитивных функций $F_p^m(x)$ приведены, например, в [17–19].

Функции транспортного спроса, как правило, выбираются либо линейные [16, 20, 21], либо экспоненциальные [22, 23].

Среди моделей описания матриц корреспонденций на практике в основном используется гравитационная модель [6, 7]:

$$(7) \quad \rho_{ij}^m = \alpha_i o_i^m \beta_j d_j^m g(u_{ij}^m),$$

где o_i^m – объем отправок типа m из узла $i \in \mathcal{O}$, d_j^m – объем прибытий типа m в узел $j \in \mathcal{D}$, $g(u_{ij}^m)$ – функция тяготения, описывает степень “удаленности” узлов i и j , α_i и β_j – коэффициенты калибровки, определяются из условий баланса по отправлениям и прибытиям:

$$(8) \quad \sum_{j \in \mathcal{D}} \rho_{ij}^m = o_i^m, \quad i \in \mathcal{O}, \quad \sum_{i \in \mathcal{O}} \rho_{ij}^m = d_j^m, \quad j \in \mathcal{D}, \quad m \in \mathcal{M}.$$

В данной статье предлагается объединить модель равновесного распределения потоков (5) и гравитационную модель описания матрицы корреспонденций (7), что позволит одновременно определять загрузку сети, корреспонденции и калибровать результаты расчетов.

Определим функцию тяготения как $g(u_{ij}^m) = \exp\{-\lambda^m u_{ij}^m\}$, где $\lambda^m > 0$ – калибровочный коэффициент. Значения калибровочных коэффициентов определяются эмпирически, например для трудовых миграций полагают $\lambda^m = 0,065$ в [24]. Положим

$$o_i^m = \frac{\rho_{ij}^m}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_{ij}^m} o_i, \quad d_j^m = \frac{\rho_{ij}^m}{\sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_{ij}^m} d_j,$$

где o_i и d_j – общие объемы отправок и прибытий из узлов $i \in \mathcal{O}$ и $j \in \mathcal{D}$ соответственно (предполагается, что на практике данные об o_i и d_j более доступны, чем об o_i^m и d_j^m). Отметим, что коэффициенты калибровки α_i и β_j в (7) вводятся в гравитационную модель исключительно с целью сбалансирования корреспонденций ρ_{ij}^m по заданным объемам отправок o_i^m и прибытий d_j^m . Рассмотрим только допустимые корреспонденции, т.е. элементы матрицы ρ удовлетворяют системе балансовых ограничений (8). В этом

случае в (7) коэффициенты $\alpha_i = \beta_j = 1$ для всех $(i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}$. В сделанных предположениях из гравитационной модели (7) можно получить зависимость транспортных издержек от объема корреспонденции:

$$u_{ij}^m(\rho) = \lambda^{-1} \ln \frac{\rho_{ij}^m o_i d_j}{\left(\sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_{ij}^m \right)^2},$$

при этом область определения функций u_{ij}^m задается условиями баланса (8). Именно эти функции будем использовать при решении вариационного неравенства (5), при этом допустимая загрузка транспортной сети (x, ρ) будет определяться множеством

$$X^\rho = \left\{ (x, \rho) \geq 0 : (x, \rho) \in X, \sum_{j \in \mathcal{D}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_{ij}^m = o_i, \sum_{i \in \mathcal{O}} \sum_{m \in \mathcal{M}} \rho_{ij}^m = d_j, (i, j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D} \right\}.$$

Учитывая изложенные предположения, прогнозирование загрузки сети сводится к поиску пары $(\bar{x}, \bar{\rho}) \in X^\rho$ такой, что

$$(9) \quad \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{(i,j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}} \sum_{p \in P_{ij}} F_p^m(\bar{x})(x_p^m - \bar{x}_p^m) - \frac{1}{\lambda} \sum_{m \in \mathcal{M}} \sum_{(i,j) \in \mathcal{O} \times \mathcal{D}} \ln \left(\frac{\bar{\rho}_{ij}^m o_i d_j}{\left(\sum_{m \in \mathcal{M}} \bar{\rho}_{ij}^m \right)^2} \right) (\rho_{ij}^m - \bar{\rho}_{ij}^m) \geq 0, \quad (x, \rho) \in X^\rho.$$

Вариационное неравенство (9) имеет ограниченную допустимую область, поэтому для его разрешимости достаточно, чтобы функции транспортных издержек по путям $F_p^m(x)$ были непрерывны [5, 13]. Равновесные свойства решений задачи (9) исследованы в [25].

3. Принципы реализации системы интерактивного 3D моделирования

При выборе метода реализации системы интерактивного 3D моделирования транспортных потоков и планирования городской инфраструктуры необходимо руководствоваться основными требованиями.

1. Система должна быть реализована как облачный сервис. Данное требование обусловлено необходимостью обеспечения как можно более широкой доступности разрабатываемого приложения для заинтересованного сообщества (при соблюдении условия регулируемого управления правами доступа). Использование приложения как облачного сервиса не накладывает дополнительных ограничений на платформу, установленную на компьютере клиента,

оперативную память, другие характеристики компьютера, а также не требует навыков инсталляции приложения.

2. Система должна быть реализована с использованием принципов ее жизнеспособности (адаптивности и адаптируемости в течение жизненного цикла). Проблема обеспечения жизнеспособности, как указывается в [11, 12], решается наличием механизмов управления программным средством (решение задач сопровождения программного средства с помощью специальных высокоуровневых механизмов, сводящих к минимуму изменение его кода).

3. Система должна быть реализована таким образом, чтобы обработка ресурсоемких вычислений (непосредственно блок моделирования) могла происходить на высокопроизводительных вычислительных архитектурах для обеспечения эффекта “реального времени” во время процесса моделирования.

4. Система должна быть реализована с использованием средств 3D графики для визуализации процессов моделирования.

Учитывая перечисленное, в качестве средства реализации выбраны облачная платформа IASPaas [11], которая представляет собой программно-информационный интернет-комплекс для обеспечения поддержки разработки, управления и удаленного использования прикладных и инструментальных мультиагентных облачных сервисов (прежде всего интеллектуальных) и их компонентов, и инструментальный комплекс ИРВИС (комплекс Интернет Разработки Виртуальных Интерактивных Сред), реализованный на данной платформе для создания виртуальных сред различного назначения [12].

Основной принцип создания виртуальных сред (в данном случае визуальное редактирование городской инфраструктуры) с использованием инструментального комплекса ИРВИС заключается в следующем: по онтологии виртуальной среды эксперты предметной области формируют логическое представление модели виртуальной среды, которое затем визуальные дизайнеры дополняют 3D представлением. Формирование декларативной модели виртуальной среды осуществляется с помощью структурного редактора (для логического представления) и графического редактора (для визуального представления). Далее декларативно описанная модель подается на вход интерпретатора, который обеспечивает ее прорисовку и логику работы в соответствии с моделью. Таким образом, создание виртуальной среды сводится к формированию ее декларативной модели, что позволяет либо полностью исключить этап ее реализации на языке программирования, либо свести реализацию к минимуму (модель виртуальной среды допускает возможность подключения дополнительных агентов обработки в случае необходимости). Такой подход к созданию виртуальных сред позволяет обеспечить все предъявляемые к реализации требования и значительно упростить процесс разработки, поскольку трудоемкий этап кодирования либо полностью исключается, либо сводится к минимуму.

3.1. Декларативная модель городской инфраструктуры

Декларативная модель городской инфраструктуры, формируемая по онтологии виртуальной среды [26], состоит из двух множеств: множества объектов и множества действий.

Объекты виртуальной среды в общем случае разделяются на следующие классы: Простой (неизменяемый) объект, Изменяемый объект, Составной объект, Таблица:

Объекты \in {Простой объект, Изменяемый объект, Составной объект, Таблица}.

В модели объектов городской инфраструктуры выделяются объекты трех типов: Простой объект, Изменяемый объект и Составной объект.

Простой объект — это объект, обладающий набором атрибутов, которые не изменяются в процессе воспроизведения сцены.

Простой объект = <Имя объекта, Характеристика, Описание, Логические атрибуты, Презентационные атрибуты> ,

Характеристика = {Класс, Экземпляр}.

Если Характеристика = Класс, то в процессе функционирования виртуальной сцены может быть сгенерировано произвольное множество экземпляров объекта данного класса с заданным при описании класса набором атрибутов. Если Характеристика = Экземпляр, то количество объектов не может быть изменено, его полное описание определяется при проектировании виртуальной среды. Объекты городской инфраструктуры включают как классы, так и экземпляры объектов транспортной сети и инфраструктуры различных типов.

Простым объектом-экземпляром в модели городской инфраструктуры является объект Ландшафт (здесь и далее атрибуты, которые не используются в описании объектов и действий, будут опущены):

Имя объекта: Ландшафт

Характеристика: экземпляр

Описание: ландшафт, на котором моделируется город, в простейшем случае – плоскость

Презентационные атрибуты: {3D модель ландшафта, текстура ландшафта, расположение в пространстве сцены}

Изменяемый объект — это объект, который является расширением простого объекта, а также включает множество изменяемых атрибутов, которые могут быть самостоятельными или объединены в логические группы – состояния. Каждое состояние определяется совокупностью значений атрибутов, которые они могут принимать в ответ на действия, происходящие в виртуальной среде.

Изменяемый объект = <Имя объекта, Характеристика, Имя класса, Описание, Множество состояний, Начальное состояние, Логические атрибуты, Презентационные атрибуты> ,

Множество состояний = {Состояние} $_{i=1}^n$.

Состояние – это множество атрибутов объекта с заданными значениями.

Состояние = <Имя, Логические атрибуты, Презентационные атрибуты> .

Изменяемыми объектами-классами являются: направление (сегмент дороги УДС) и инфраструктурные объекты (жилой дом, административное зда-

ние, производственное предприятие, торговый комплекс и т.д.). Приведем пример класса изменяемого объекта:

Имя объекта: Направление
Характеристика: класс
Множество состояний: {1 полоса, 2 полосы, 3 полосы, 4 полосы}
Начальное состояние: 1 полоса
Логические атрибуты: {полосность, разрешенная скорость}

Приведем пример одного из экземпляров объектов **Направление** со следующими параметрами: количество полос = 2, разрешенная скорость = 50. В презентационных атрибутах данного объекта указываются только повороты, другие презентационные атрибуты данного объекта относятся к родительскому объекту данного объекта.

Имя объекта: НаправлениеК1
Характеристика: экземпляр
Имя класса: Направление
Множество состояний: {1 полоса, 2 полосы}
Начальное состояние: 2 полосы
Логические атрибуты: {полосность (2), разрешенная скорость (50)}
Презентационные атрибуты: {повороты (0; 0,5; 0,3)}

Составной объект — это объект, который является расширением изменяемого объекта, а также включает множество дочерних объектов, являясь для них своего рода контейнером (родителем).

Составной объект = <Имя объекта, Характеристика, Имя класса, Описание, Множество состояний, Начальное состояние, Множество дочерних объектов, Логические атрибуты, Презентационные атрибуты> ,

Множество дочерних объектов = {Объект_{*i*}}^{*n*}_{*i=1*}.

Объект_{*i*} — один из описанных ранее классов объектов: Простой объект, Изменяемый объект, Составной объект.

Приведем пример описания составного объекта-класса **Сегмент дороги**, а также объект-экземпляр этого класса, который может быть порожден в процессе моделирования:

Имя объекта: Сегмент дороги
Характеристика: класс
Описание: шаблон 3D объекта для отдельного участка дороги
Множество дочерних объектов: [направлениеА <ссылка на объект класса Направление>, направлениеБ <ссылка на объект класса Направление>]
Логические атрибуты: {длина}
Презентационные атрибуты: {3D модель сегмента, текстура покрытия}.

На основе данного класса объекта **Сегмент дороги** порождается множество экземпляров объектов **Сегмент дороги**, $i = 1, 2, \dots, n$, который наследует все атрибуты своего класса **Сегмент дороги**, но имеет уникальные значения логических и презентационных атрибутов. Приведем пример одного конкретного экземпляра сегмента дороги со следующими параметрами: дли-

на = 10, координаты (в пространстве сцены) = (0; 150; 200), повороты (0; 0,5; 0,3), размеры (1; 1,2; 0,7).

Имя объекта: Сегмент дороги i

Характеристика: экземпляр

Имя класса: Сегмент дороги

Описание: экземпляр 3D объекта для отдельного участка дороги

Множество дочерних объектов: [НаправлениеК1, НаправлениеК2]

Логические атрибуты: {длина сегмента (10)}

Презентационные атрибуты: {3D модель сегмента, текстура покрытия (асфальт), координаты (0; 150; 200), повороты (0; 0,5; 0,3), размеры (1; 1,2; 0,7)}

Действия в онтологии виртуальной среды описывают все действия, которые можно производить с объектами виртуальной среды либо с классами объектов. Описание действия в общем случае состоит из следующих элементов:

Действие = <Имя действия, Тип, Описание, Входные параметры, Изменение состояния объектов, Получение оценки, Параметры обработки, Сообщение>.

Выделяются следующие типы действий:

Командные действия — это действия, которые пользователь совершает над объектами либо классами объектов вне пространства виртуальной среды (с помощью элементов интерфейса или голоса);

Интерактивные действия — это действия, которые пользователь совершает над объектами или классами объектов, находясь в пространстве виртуальной среды;

Простые действия — это действия, которые пользователь не выполняет непосредственно, а которые выполняются виртуальной средой на основе параметра другого действия.

Действия могут быть проверены с помощью входных параметров. Входные параметры определяют, выполнены ли необходимые условия для обработки данного действия. Результаты выполнения действий могут быть связаны с изменением виртуальной среды или получением информации. Изменение виртуальной среды предполагает изменение объектов виртуальной сцены путем изменения их состояний. Действиями в модели транспортного моделирования являются: изменить направление движения, изменить полосность, изменить разрешенную скорость, изменить количество этажей, изменить количество секций, изменить количество торговых площадок и др. Например, рассмотрим формальное описание действия **Изменить полосность**:

Имя действия: Изменить полосность

Тип: интерактивное действие

Описание: действие позволяет менять полосность на объектах класса Сегмент дороги

Изменение состояния объектов: {объект (Сегмент дороги), состояние (1 полоса)}

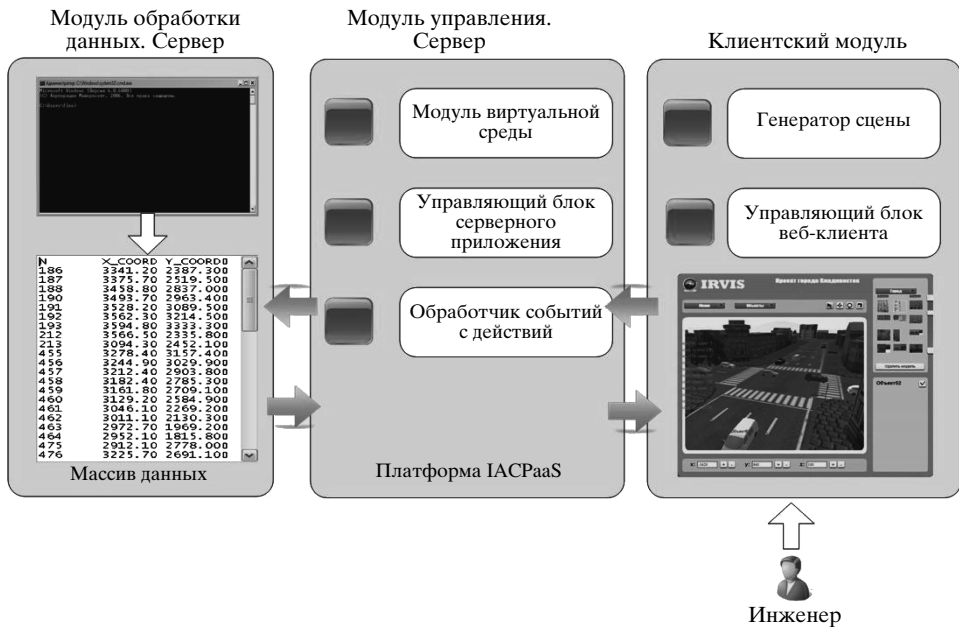
Сообщение: изменить полосность

Данное действие позволяет установить полосность сегмента дороги равной одной полосе движения. Действие изменяет объект с заданной характеристикой Класс, это означает, что оно будет применимо для всех объектов-экземпляров данного класса.

3.2. Архитектура облачного сервиса для моделирования транспортных потоков и городской инфраструктуры

В общем случае сервис моделирования транспортных потоков и городской инфраструктуры состоит из трех основных модулей: модуля управления, модуля обработки данных и клиентского модуля (см. рисунок). Модуль управления реализован на платформе IACPaas и содержит модель виртуальной среды, управляющий блок серверного приложения и обработчик событий и действий, произведенных пользователем.

Работа с системой начинается с запуска управляющего блока серверного приложения, который производит загрузку модели виртуальной среды, ее преобразование, сохранение во временное состояние и осуществляет http-запрос входных данных от модуля обработки данных, расположенного на внешнем сервере по отношению к серверу, на котором находится модуль управления. Http-запрос инициирует запуск расчета данных о состоянии транспортных потоков и городской инфраструктуры и их передачу управляющему блоку серверного приложения, после чего декларативная модель городской инфраструктуры и входные данные поступают клиентскому модулю. В веб-клиенте генератор сцены строит трехмерную виртуальную сцену: генерируются объекты сцены, загружаются необходимые медиа-данные (3D-модели, текстуры), с объектами связываются анализаторы событий, устанавливается управление сценой.



Архитектура облачного сервиса.

4. Заключение

Активные исследования в области моделирования транспортных проблем начались более полувека назад, но несмотря на это их актуальность со временем только возрастает, поскольку существующие транспортные сети не справляются с постоянно увеличивающейся на них нагрузкой. Планирование развития транспортных систем и прилегающей инфраструктуры должно опираться на предварительный объективный анализ их эффективности. Основным инструментом такого анализа в настоящее время является специальное ПО, в котором реализованы законы функционирования транспортной сети и поведенческие принципы ее пользователей.

Основное назначение такого ПО — моделирование трафика в УДС. Однако современное ПО моделирования транспортных потоков, являясь, как правило, универсальным, не успевает за последними теоретическими достижениями в данной области, не доступно широкому кругу пользователей, является дорогостоящим. В данной работе для устранения указанных недостатков предлагается реализовать систему транспортного моделирования как облачный сервис, предоставляющий удобный инструмент для моделирования УДС и градостроительных объектов и использующий для численных расчетов трафика последние достижения в транспортной науке.

В настоящий момент для прогнозирования критической загрузки УДС решается мультимодальная задача транспортного равновесия с эластичным спросом, построенная в результате синтеза гравитационной модели описания матриц корреспонденций и модели равновесного распределения потоков. Исходная задача переписывается в терминах вариационного неравенства и применяются соответствующие численные методы. Решение вариационного неравенства заменяет три традиционных этапа моделирования транспортных потоков (определение транспортных корреспонденций, расщепление потоков по типам, распределение потоков по маршрутам) и позволяет одновременно калибровать результаты моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введение в математическое моделирование транспортных потоков. Уч. пос. Изд. 2-е, испр. и доп. / Под ред. А.В. Гасникова. М.: МЦНМО, 2013.
2. *Cascetta E.* Transportation systems analysis: models and applications. 2nd ed. N.Y.: Springer, 2009.
3. *Бекмагамбетов М.М., Кочетков А.В.* Анализ современных программных средств транспортного моделирования // Журн. ААИ. 2012. № 6 (77). С. 25–34.
4. *Яцкив И.В., Юршевич Е.А., Колмакова Н.В.* Использование возможностей имитационного моделирования для анализа транспортных узлов // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2005). Сб. докл. 2-й Всерос. конф. Т. 2. СПб.: ЦТ СС, 2005. С. 237–245.
5. *Patriksson M.* The traffic assignment problem. Models and methods. Utrecht, The Netherlands: VSP, 1994.
6. *Вильсон А. Дж.* Энтропийные методы моделирования сложных систем. М.: Наука, 1978.
7. *Erlander S., Stewart N.T.* The gravity model in transportation analysis. Theory and extensions. Utrecht, The Netherlands: VSP, 1990.

8. *Wardrop J.* Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // Proc. Institute of Engineers. Part II. 1952. V. 1. P. 325–378.
9. *Beckmann M., McGuire C.B., Winsten C.B.* Studies in the economics of transportation. RM-1488. Santa Monica: RAND Corporation, 1955.
10. *Dafermos S.* Traffic Equilibrium and Variational Inequalities // Transpn. Sci. 1980. V. 14. No. 1. P. 42–54.
11. *Грибова В.В., Клещев А.С., Крылов Д.А. и др.* Проект ИАСРaaS. Комплекс для интеллектуальных систем на основе облачных вычислений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2011. № 1. С. 27–35.
12. *Грибова В.В., Федорищев Л.А.* Программный комплекс для разработки облачных виртуальных сред // Программные продукты и системы. 2015. № 2. С. 60–64.
13. *Nagurney A.* Network economics. A variational inequality approach. Dordrecht: Kluwer Acad. Publish., 1999.
14. *Sheffi Y.* Urban transportation networks. Equilibrium analysis with mathematical programming methods. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
15. *Aashtiani H.* The multi-modal traffic assignment problem [PhD thesis]. Cambridge, MA: Operations Research Center, MIT, 1979.
16. *Dafermos S.* The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Demand // Networks. 1982. V. 12. No. 1. P. 57–72.
17. *Gabriel S.A., Bernstein D.* The Traffic Equilibrium Problem with Nonadditive Path Costs // Transpn. Sci. 1997. V. 31. No. 4. P. 337–348.
18. *Lo H.K., Chen A.* Traffic Equilibrium Problem with Rout-specific Costs. Formulation and Algorithms // Transpn. Res. B. 2000. V. 34. No. 6. P. 493–513.
19. *Agdeppa R.P., Yamashita N., Fukushima M.* The Traffic Equilibrium Problem with Nonadditive Costs and its Monotone Mixed Complementarity Problem Formulation // Transpn. Res. B. 2007. V. 41. P. 862–874.
20. *Florian M., Nguyen S.* A Method for Computing Network Equilibrium with Elastic Demands // Transpn. Sci. 1974. V. 8. No. 4. P. 321–332.
21. *Hearn D.W., Yildirim M.B.* A toll pricing framework for traffic assignment problems with elastic demand / Technical report. Center for Applied Optimization Industrial and Systems Engineering Department. University of Florida, 2002.
22. *Leblanc L.J., Farhangian K.* Efficient Algorithms for Solving Elastic Demand Traffic Assignment Problems and Mode Split-assignment Problems // Transpn. Sci. 1982. V. 15. No. 4. P. 306–317.
23. *Babonneau F, Vial J.-P.* An Efficient Method to Compute Traffic Assignment Problems with Elastic Demands // Transpn. Sci. 2008. V. 42. No. 2. P. 249–260.
24. *Лившиц В.В., Стрельников А.И.* Калибровка и проверка гравитационной статистической модели трудовых корреспонденций. М.: ЦНИИП градостроительства, 1983. С. 79–101.
25. *Shamray N.* The General Multimodal Network Equilibrium Problem with Elastic Balanced Demand // Proc. DOOR 2016, Vladivostok, Russia, September 19–23, 2016. CEUR-WS. 2016. V. 1623. P. 404–414. CEUR-WS.org, online <http://ceur-ws.org/Vol-1623/papertl6.pdf>
26. *Грибова В.В., Федорищев Л.А.* Обучающие виртуальные системы и средства их создания // Вестн. информационных и компьютерных технологий. 2012. № 3. С. 48–51.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.В. Гасниковым.

Поступила в редакцию 28.06.2015