

*У статті розглядаються принципи побудови агентної моделі для моделювання транспортних потоків в міських умовах. Запропоновані способи і методи моделювання зовнішнього середовища і руху транспорту на перехресті*

*Ключові слова: агент, модель, смуга, потік, траєкторія*

*В статье рассматриваются принципы построения агентной модели для моделирования транспортных потоков в городских условиях. Предложены способы и методы моделирования внешней среды и движения транспорта на перекрестке*

*Ключевые слова: агент, модель, полоса, поток, траектория*

*In the article principles of construction of agent modelling are examined for the design of transport streams in city terms. Methods of design of external environment and motion of transport are offered on crossing*

*Keywords: agent, model, stripe, stream, trajectory*

## АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТА НА ПЕРЕКРЕСТКЕ

**И. М. Патракеев**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: shumakov@ksame.kharkov.ua

**В. А. Толстохатко**

Кандидат технических наук, профессор\*

Контактный тел. (057) 707-31-04

E-mail: tolstochatko@rambler.ru

**Аль-Манасра Рами Анвар\***

\*Кафедра геоинформационных систем и геодезии

Харьковская национальная академия городского

хозяйства

ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002

### Введение

В течение последних лет все серьезнее встает проблема дорожного движения в городах, поскольку резко увеличилось общее количество личного транспорта. В часы пик на дорогах резко повышается интенсивность движения автотранспорта из-за того, что большинство людей едут на работу практически в одно и тоже время. В это время на многих участках дорог, особенно в центральной части города, где сосредотачиваются бизнес-центры и другие организации, возникают "пробки" – длинные очереди автомобилей перед перекрестками, что существенно замедляет движение транспорта и увеличивает время передвижения в черте города. Для разрешения проблемы "пробок" требуются большие капиталовложения в модернизацию дорожно-транспортной сети города и автостоянок. Следовательно, принимаемые решения должны базироваться на результатах специальных исследований потоков городского транспорта. Для проведения исследований можно использовать современные геоинформационные системы и адекватные модели потоков транспорта на магистралях города. Геоинформационные системы целесообразно использовать для пространственного анализа дорожно-транспортной системы города, выбора проблемных участков и определения их пространственных характеристик.

На основании полученных данных можно с помощью математических моделей исследовать влияние неблагоприятных факторов на пропускную способность дорожно-транспортной сети и на основании полученных результатов выработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию транс-

портной системы города. Такой подход принят при разработке модели.

Существуют различные подходы к построению моделей, предназначенных для исследования транспортных потоков [1, 2]. Одним из перспективных подходов является использование агентных моделей, в которых динамика и глобальные правила функционирования сложных систем определяются по результатам индивидуальной активности элементов системы. К подобным системам можно отнести дорожно-транспортную сеть города, в которой динамика движения потока определяется индивидуальным поведением водителей автомобилей. В статье рассматривается один из способов построения агентной модели, предназначенной для исследования транспортных потоков.

### Принцип построения агентной модели движения транспорта

Агентная модель представляет реальный мир в виде многих отдельных активных подсистем, называемых агентами. Под агентом понимают объект, который взаимодействует с окружением и другими агентами, обладает активностью, автономным поведением и может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил [1].

В предлагаемой модели в качестве агентов рассматриваются автомобили, которыми управляют водители. Светофоры также рассматриваются как агенты, поскольку они работают автономно по заранее определенным правилам. Общей внешней средой для агента является проезжая часть дороги со всеми

расположенными на ней средствами организации дорожного движения и другие агенты. В процессе движения агент постоянно взаимодействует с внешней средой, анализируя дорожные знаки и световые сигналы светофоров. Взаимодействие между агентами также осуществляется с помощью световых сигналов, которые сообщают другим агентам о намерении выполнить остановку, маневр, поворот или другие действия.

Таким образом, агентная модель транспортного потока должна включать описание внешней среды агента, внутреннее состояние агента, действия агента и правила их выполнения. В качестве нормативной базы в модели используются правила дорожного движения Украины [3].

**Способ описания внешней среды**

Внешнюю среду модели образуют границы проезжей части дороги, полосы движения, возможные траектории агентов, светофоры и другие агенты.

Для описания внешней среды будем использовать принцип векторизации, широко применяемый на практике при обработке пространственных данных. Каждый элемент внешней среды представим набором опорных точек и выполним их привязку к выбранной системе координат. Зная свои координаты и координаты опорных точек элементов внешней среды, агент сможет ориентироваться в этой среде и выполнять действия, необходимые для достижения определенной цели.

Геометрическая интерпретация принципа векторизации приведена на рис. 1, где показаны опорные точки внешней среды, используемые в модели. В качестве примера на рис. 1 показан снимок пересечения пр. Ленина и ул. 23 Августа г. Харькова, а также геометрическая модель перекрестка.

Исходными данными для моделирования перекрестка являются:

1. Космические снимки исследуемой территории, например, снимок территории Харьковской области.
2. Координаты начальной  $(X_{in}, Y_{in})$  и конечной  $(X_{ik}, Y_{ik})$  точек средних линий главной ( $i=1$ ) и второстепенной ( $i=2$ ) дорог.

Количество полос движения на главной ( $m_1$ ) и второстепенной ( $m_2$ ) дорогах.

Эта информация определяется в процессе обработки и анализа снимка с использованием геоинформационной системы (ГИС), например, ArcGIS 9.3.

При разработке модели внешней среды приняты следующие допущения и обозначения (рис. 1):

1. Моделирование внешней среды выполняется в прямоугольной системе координат  $oxy$  с началом координат  $x_0 = 0$  и  $y_0 = 0$ .
2. Главная дорога проходит параллельно оси  $x$ , дороги пересекаются под углом  $\alpha$ . В данном примере в соответствие со снимком угол  $\alpha$  равен  $90^\circ$ .

3. Дороги предназначены для двустороннего движения по  $m_i/2$  полосам на каждой стороне. Для обозначения элементов дорог используются индексы  $i, j, l$ , где  $i$  – индекс дороги (рис. 1). Индекс  $j$  обозначает направления движения на дороге:  $j = 1$  – движение слева направо на главной дороге и снизу вверх – на второстепенной дороге, а  $j = 2$  – движение в обратном направлении.

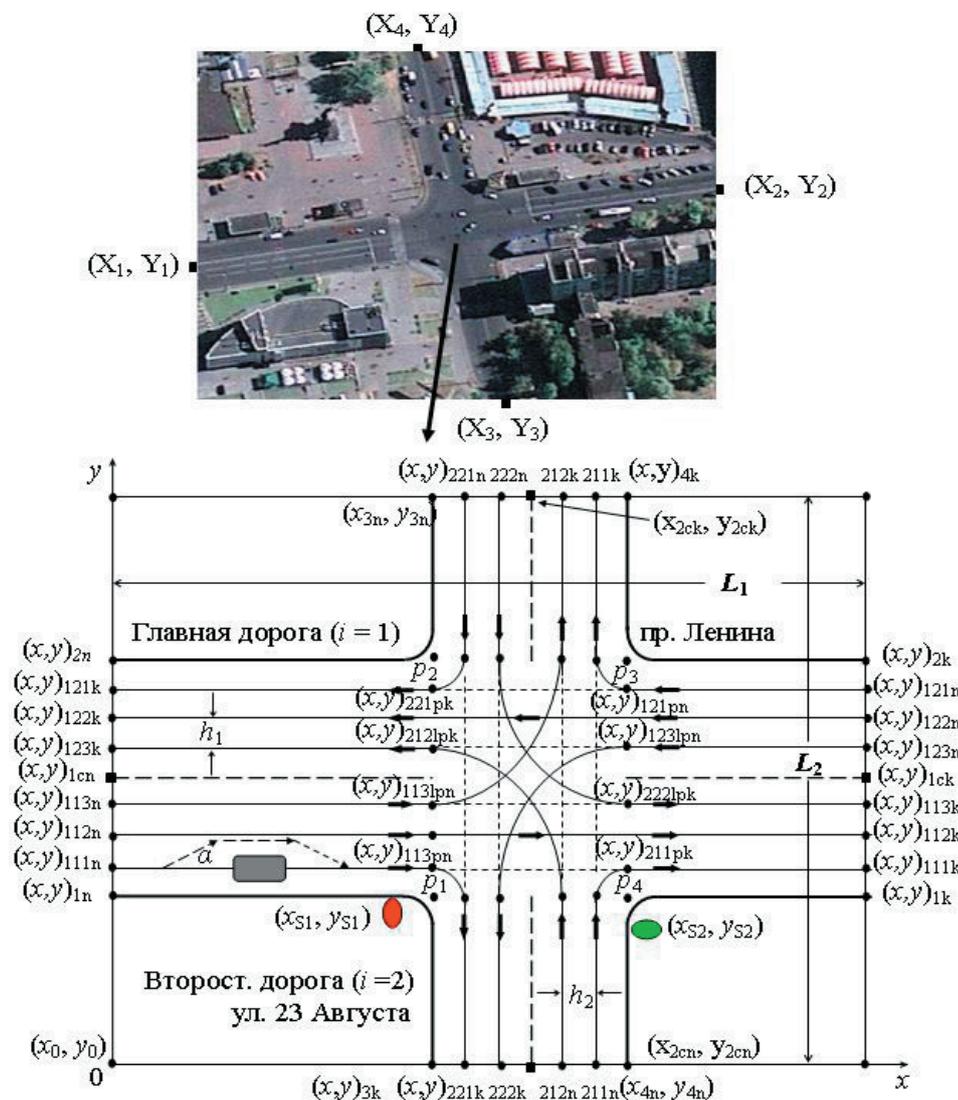


Рис. 1. Геометрическая интерпретация модели перекрестка

Номера полос движения и траекторий агентов обозначаются индексом  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, m_i / 2$ ). Эта информация используется при принятии решений.

4. В модели принято допущение, что на перекрестке установлены два светофора, положение которых определяют координаты  $(x_{S1}, y_{S1})$  и  $(x_{S2}, y_{S2})$ . Каждый светофор представлен в виде одной секции, на которой последовательно отображаются световые сигналы зеленого, желтого и красного цвета в течение времени  $t_{z1}, t_{ж1}, t_{к1}$  соответственно.

На обоих светофорах одинаковыми могут быть только сигналы желтого цвета. Красный и зеленый цвет совпадать не могут. Эти правила работы светофоров соблюдаются при выполнении следующих условий:  $t_{к1} = t_{з2}, t_{з1} = t_{к2}, t_{ж1} = t_{ж2}$ .

Внешняя среда представлена в модели множеством координат опорных точек.

Процесс вычисления координат опорных точек будем называть векторизацией внешней среды. В процессе векторизации вычисляются следующие параметры (рис. 1):

1. Длина главной и второстепенной дорог:

$$L_i = \sqrt{(x_{i2} - x_{i1})^2 + (y_{i2} - y_{i1})^2}, \text{ где } i = 1, 2.$$

2. Координаты опорных точек средних линий дорог:

$$\begin{aligned} x_{1cn} &= x_0, & y_{1cn} &= y_0 + L_2 / 2; \\ x_{1ck} &= x_{1cn} + L_1, & y_{1ck} &= y_{1cn}; \\ x_{2cn} &= x_0 + L_1 / 2, & y_{2cn} &= y_0; \\ x_{2ck} &= x_{2cn} + L_2, & y_{2ck} &= y_{2cn} + L_2. \end{aligned}$$

Индексы  $n$  и  $k$  обозначают начальную и конечную опорные точки.

3. Координаты опорных точек главной дороги:

$$\begin{aligned} x_{1n} &= x_0, & y_{1n} &= y_{1cn} - h_1 m_1 / 2; \\ x_{2n} &= x_{1n}, & y_{2n} &= y_{1cn} + h_1 m_1 / 2; \\ x_{1k} &= x_{1cn} + L_1, & y_{1k} &= y_{1n}; \\ x_{2k} &= x_{2n} + L_1, & y_{2k} &= y_{2n}. \end{aligned}$$

4. Координаты опорных точек перекрестка:

$$\begin{aligned} x_{p1} &= x_{2cn} - h_2 m_2 / 2, & y_{p1} &= y_{1n}; \\ x_{p2} &= x_{p1}, & y_{p2} &= y_{1cn} + h_1 m_1 / 2; \\ x_{p3} &= x_{p2} + h_2 m_2, & y_{p3} &= y_{p2}; \\ x_{p4} &= x_{p3}, & y_{p4} &= y_{1n}; \end{aligned}$$

5. Координаты опорных точек второстепенной дороги:

$$\begin{aligned} x_{3n} &= x_{p1}, & y_{3n} &= y_0 + L_2; \\ x_{3k} &= x_{3n}, & y_{3k} &= y_0; \\ x_{4n} &= x_{p4}, & y_{4n} &= y_0; \\ x_{4k} &= x_{4n}, & y_{4k} &= y_{3n}; \end{aligned}$$

6. Координаты опорных точек траекторий главной дороги:

$$\begin{aligned} x_{11n} &= x_{12k} = x_0, & l &= 1, 2, 3; \\ x_{11k} &= x_{12n} = x_0 + L_1, & l &= 1, 2, 3; \\ y_{11n} &= y_{11k} = y_{1cn} - 3h_1; \\ y_{112n} &= y_{112k} = y_{1cn} - 2h_1; \\ y_{113n} &= y_{113k} = y_{1cn} - h_1; \\ y_{121n} &= y_{121k} = y_{1cn} + 3h_1; \\ y_{122n} &= y_{122k} = y_{1cn} + 2h_1; \\ y_{123n} &= y_{123k} = y_{1cn} + h_1; \end{aligned}$$

7. Координаты опорных точек траекторий второстепенной дороги:

$$\begin{aligned} x_{211n} &= x_{212k} = x_{2cn} + 2h; \\ x_{212n} &= x_{212k} = x_{2cn} + h; \\ x_{221n} &= x_{222k} = x_{2cn} - 2h; \\ x_{222n} &= x_{222k} = x_{2cn} - h; \\ y_{21n} &= y_{21k} = y_0, & l &= 1, 2; \\ y_{21k} &= y_{22n} = y_0 + L_2, & l &= 1, 2. \end{aligned}$$

8. Координаты опорных точек правого поворота (pr) с первой полосы главной дороги прямого направления движения:

$$\begin{aligned} x_{111prn} &= x_{p1}, & y_{111prn} &= y_{11n}; \\ x_{111prk} &= x_{221k}, & y_{111prk} &= y_{1n}. \end{aligned}$$

9. Координаты опорных точек правого поворота с первой полосы главной дороги встречного направления движения:

$$\begin{aligned} x_{121prn} &= x_{p3}, & y_{121prn} &= y_{121n}; \\ x_{121prk} &= x_{211k}, & y_{121prk} &= y_{p3}. \end{aligned}$$

10. Координаты опорных точек правого поворота с первой полосы второстепенной дороги прямого направления движения:

$$\begin{aligned} x_{211prn} &= x_{211n}, & y_{211prn} &= y_{p4}; \\ x_{211prk} &= x_{4n}, & y_{211prk} &= y_{11n}. \end{aligned}$$

11. Координаты опорных точек правого поворота с первой полосы второстепенной дороги встречного направления движения:

$$\begin{aligned} x_{221prn} &= x_{221n}, & y_{221prn} &= y_{p2}; \\ x_{221prk} &= x_{p2}, & y_{221prk} &= y_{121k}. \end{aligned}$$

12. Координаты опорных точек левого поворота (lp) с третьей полосы главной дороги прямого и встречного направления движения:

$$\begin{aligned} x_{113lpn} &= x_{p1}, & y_{113lpn} &= y_{113n}; \\ x_{113lpk} &= x_{212k}, & y_{113lpk} &= y_{p3}; \\ x_{123lpn} &= x_{p3}, & y_{123lpn} &= y_{123n}; \\ x_{123lpk} &= x_{222k}, & y_{123lpk} &= y_{p1}. \end{aligned}$$

13. Координаты опорных точек левого поворота со вторых полос прямого и встречного направления движения:

$$\begin{aligned} X_{212lpn} &= X_{212n}, & Y_{212lpn} &= Y_{p4}, \\ X_{212lpk} &= X_{p2}, & Y_{212lpk} &= Y_{123k}, \\ X_{222lpn} &= X_{222n}, & Y_{222lpn} &= Y_{p2}, \\ X_{222lpk} &= X_{p4}, & Y_{222lpk} &= Y_{113k}, \end{aligned}$$

**Моделирование состояний агента**

Построение модели состояний агентов выполним при следующих допущениях и ограничениях [3]:

1. Максимальное число полос движения на дороге – шесть, по три полосы на каждом направлении движения.
2. Состояние агента описывается признаком Р, который принимает два значения: 0 (задается по умолчанию) или 1 (агент находится в данном состоянии). Исключением является признак полосы движения (Рпд), который может принимать одно из трех значений – 1, 2 или 3.
3. Движение начинается с начала первой полосы любого направления движения. Траектория моделируется по середине полосы движения. Скорость движения постоянная, но значение скорости зависит от вида движения: прямолинейное движение, правый или левый поворот, маневр.
4. В процессе движения агент может находиться в одном из следующих состояний (рис. 1):
  - равномерное движение на участках до перекрестка и после прохождения перекрестка (признак Рп), скорость движения  $V_p$ , м/с;
  - смена правой полосы движения на левую (признак Рпл), скорость движения  $V_{пл}$ , м/с;
  - смена левой полосы движения на правую (признак Рлп), скорость движения  $V_{лп}$ , м/с;
  - поворот направо (признак Рпр), скорость движения  $V_{пр}$ , м/с;
  - поворот налево (признак Рл), скорость движения  $V_{л}$ , м/с;
  - обгон (признак Ро), скорость движения  $V_o$  превышает скорость попутного транспортного средства, которое движется рядом по сопредельной полосе, м/с;
  - начало маневра, поворота или остановки (признак Рм = 1);
  - завершение маневра, поворота или остановки (признак Рм = 0);
  - движение на дороге (признак Рд): Рд = 0 – движение по главной дороге, Рд = 1 – движение по второстепенной дороге;
  - направление движения (признак Рн): Рн = 0 – движение в прямом направлении, Рн = 1 – движение в обратном направлении;

5. При изменении состояния агент самостоятельно изменяет соответствующие признаки.
6. При достижении конца полосы движения, агент удаляется.
7. Моделирование выполняется в реальном или модельном времени, которое регулируется установкой интервала таймера.

Принятые допущения и признаки позволяют моделировать движение агентов в соответствии с правилами дорожного движения [3].

В модели применяются следующие методы моделирования движения.

*Движение на линейном участке.* Координаты точек траектории вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + V_n \cos(\alpha) * T_0, \\ y_i &= y_{i-1} + V_n \sin(\alpha) * T_0, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $T_0$  – интервал времени, определяющий шаг моделирования, с;

$$\alpha = \begin{cases} 0, & \text{лин. участки главной дороги, прямое направление движения,} \\ 180^\circ, & \text{лин. участки главной дороги, встречное направление движения,} \\ 90^\circ, & \text{лин. участки второст. дороги, прямое направление движения,} \\ 270^\circ, & \text{лин. участки второст. дороги, встречное направление движения.} \end{cases} \tag{2}$$

Начальные значения  $x_0, y_0$  на первом шаге определяются по значениям координат точки входа на полосу движения.

Моделирование прямолинейного движения завершается при достижении конца линейного участка, на котором моделируется движение.

*Движение при смене полосы.* При смене полосы считаем, что участок движения имеет линейный характер (рис. 1).

Координаты траектории вычисляются по формулам (1), но только угол  $\alpha$  изменяется на величину  $\Delta\alpha$ . В модели принято  $\Delta\alpha = 15$  градусов.

*Движение на участке поворота.* Моделируется в предположении, что скорость на выраже постоянная. Координаты точек траектории на выражах вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} x_i &= R \cos \gamma_i, & y_i &= R \sin \gamma_i, \\ \gamma_i &= \gamma_{i-1} \pm \Delta\gamma, \\ \Delta\gamma &= VT_0 / R. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь: R – радиус правого или левого поворота;  $\gamma$  – текущее значение угла поворота;  $\Delta\gamma$  – угол, который проходит агент за время  $T_0$ . Знак “+” или “-” определяется по направлению поворота (рис. 1);

Принцип классификации состояний агента  
Классификация состояния производится на каждом интервале моделирования методом ближайшего соседа (рис. 2).

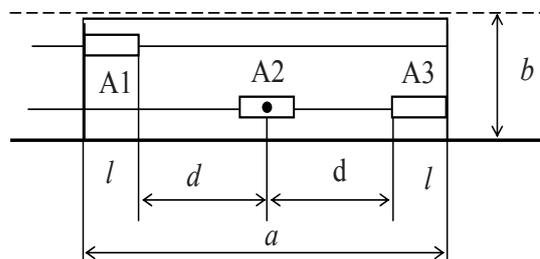


Рис. 2. Принцип классификации состояний

Для анализа обстановки и принятия решения на выполнение очередного действия каждый агент, например, агент A2 анализирует состояния объектов, попавших в кластер размером  $a \times b$ . Размеры кластера определяются по формулам (4):

$$a = 2d + 2l, b = 2h_i, \quad (4)$$

$b$  – ширина кластера, м;

$l$  – длина автомобиля, м;

$h_i$  – ширина полосы  $i$ -й дороги, м ( $i = 1, 2$ );

$d$  – безопасная дистанция между агентами, м [3].

В данном примере агент A2 анализирует признаки состояния одного или двух ближайших агентов, попавших в кластер. В зависимости от состояний ближайших соседей агент A2 принимает решение на продолжение пути по своей полосе, либо на выполнение маневра или поворота. Условия выполнения действий реализованы в виде правил (продукций) типа «ЕСЛИ-ТО».

Плотный проект агентной модели реализован на языке C++ в системе визуального программирования C++Builder 6.

---

### Выводы

---

Полученная агентная модель может представлять практическую пользу для ученых и инженеров, заинтересованных в моделировании движения транспортных средств. С её помощью можно проводить исследования и анализ транспортных потоков с целью выявления условий возникновения пробок или снижения пропускной способности транспортных магистралей.

В настоящее время производится доработка и совершенствование программного продукта, чтобы адаптировать его к разным предметным областям, где участвуют подвижные во времени и пространстве объекты и процессы.

---

### Литература

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование на AnyLogic 5. [Электронный ресурс] / БХВ\_Петербург, С.Петербург, 2005.
2. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика [Электронный ресурс] / Exponenta Pro, N 3-4, 2004.
3. Правила Дорожного Руху України [Текст]. Постанова Кабінету Міністрів України від 10 жовтня 2001 р. N 1306 / Київ.