

УДК 519.711

ББК 22.18

КРАТКИЙ ОБЗОР МНОГОАГЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

Кузнецов А.В.¹,

(Воронежский государственный университет, Воронеж)

Статья посвящена обзору различных областей применения многоагентных систем. Рассматриваются примеры многоагентных моделей разных типов в механике, биологии, транспорте, моделировании роя и строя роботов и в экономике.

Ключевые слова: агентно-ориентированное моделирование, автономные агенты, многоагентные системы.

Введение

В настоящее время многоагентные системы находят все большее применение в самых разных отраслях науки и техники. В отличие от традиционных способов математического моделирования они позволяют работать не с интегральными характеристиками описываемой системы, а с каждым ее элементом в отдельности. Пользуясь агентной парадигмой, можно уйти от решения громоздких или просто неизвестных уравнений, описывающих исследуемый объект, можно легко применять параллельные вычисления. Наконец, часто при достаточно большом количестве агентов, можно получить и традиционные модели из агентных.

В данном обзоре будет идти речь о примерах применения агентных моделей. Разумеется, этот обзор ни в коей мере не претендует на полноту, но автор ставил цели привести примеры моделей из самых разных отраслей знания. Для ясности дальнейшего изложения, дадим следующие определения.

Сложная система – система, которая может быть разложена на многие компоненты, имеющие относительно много взаимосвя-

¹ Кузнецов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент (avkuz@bk.ru).

зей между ними, так что поведение каждого компонента зависит от поведения остальных [44].

Агент – это реальная или виртуальная автономная сущность, работающая во внешней среде, способная воспринимать и действовать в этой среде. Агент может общаться с другими агентами, проявлять независимое поведение, которое может быть рассматриваемо как следствие его знаний, взаимодействия с другими агентами и целей, которых он должен достичь [14].

Таким образом, многоагентная система – это сложная система, которая состоит, в основном, из агентов.

Модель убеждений, желаний и намерений (belief, desire, and intention model, BDI) – популярная техника проектирования агентов [36]. В этой модели «убеждения» – это известные агенту сведения о мире, а также правила вывода новых сведений из доступных, «желания» соотносятся с планируемыми задачами агента, а «намерения» – с действиями, которые агент должен выполнить для осуществления своих задач. В эту модель включают также «события» – то, что может изменить «убеждения», «желания» и «намерения». Классические модели BDI используют темпоральную Computational Tree Logic CTL*, однако, следует понимать, что буквальное (а не концептуальное) следование таким конструкциям может существенно затруднить разработку программного обеспечения в силу трудности реализации CTL*.

1. Предыдущие обзоры общего характера

В одном из первых (1999 г.) обзоров [19] было предложено следующее деление методологий построения агентных систем на

1. объектно-ориентированные методологии, в которых агенты (в том числе и BDI агенты) рассматриваются как активные объекты,
2. методологии инженерии знаний (Knowledge engineering, KE), в которых используются онтологии и решатели задач,
3. формальные подходы, основанные на применении формальных языков и темпоральной модальной логики,

4. смешанные варианты.

В обзоре 2000 г. [45] многоагентные системы (Multiagent Systems) рассматривались вместе с распределенным решением задач (Distributed Problem Solving) как составные части распределенного искусственного интеллекта (Distributed Artificial Intelligence). В указанном обзоре излагались различные обычные сценарии для многоагентных систем и перечислялись возможности для применения техник машинного обучения. Предлагалась классификации систем агентов по двум измерениям:

1. степень неоднородности агентов (гомогенные и гетерогенные системы).

2. количество и вид взаимодействия агентов друг с другом.

По первому измерению системы агентов можно подразделить на гомогенные и гетерогенные, по второму – различать общающихся и необщающихся агентов, кооперативных и соревнующихся агентов и т.п.

В докладе 2004 г. [12] различалось аналитическое (с помощью уравнений) и имитационное моделирование (simulation), применяемое в случае затруднительности решения или формулировки аналитической модели. В имитационном моделировании выделялись такие подходы, как System Dynamics, дискретно-событийное моделирование и агентное моделирование. При этом демонстрировалось, что решение в агентной модели при достаточно большом количестве агентов соответствует решению в рамках System Dynamics и предлагался довольно известный сейчас инструмент мультипарадигменного моделирования AnyLogic.

К 2006 г. уже существовали десятки сред разработки агентных систем. Например, в обзоре [47] перечислялись декларативные, императивные и смешанные языки описания агентов и многие существовавшие на тот момент IDE. Одним из ключевых свойств агентных систем является способность к параллельному и распределенному вычислению и различные решения в этой области рассмотрены в обзоре 2014 г. [48]. В упомянутом обзоре сравнивалась производительность систем Repast Symphony, Mason, NetLogo, Gama, а также нативно поддерживающих парал-

тельные вычисления систем RepastHPC, D-Mason, Pandora, Flame и JADE. Один из наиболее полных обзоров поддерживаемых в настоящее время агентных платформ приведен в [25]. В числе прочего, там указано, что наиболее популярной средой агентного моделирования является написанная на java JADE.

2. Задачи, решаемые с помощью агентного подхода

2.1. Механика

В механике твердого тела, в механике жидкости и газа существуют подходы, в которых среда рассматривается как множество последовательно движущихся по дискретной решетке или сталкивающихся фиктивных частиц, т.е. как клеточный автомат. Примерами таких методов является movable cellular automaton (MCA, [5]), Lattice Gas cellular automata и Lattice Boltzmann methods (LBM).

Пусть $f_i(\vec{x}, t)$ – одночастичная функция распределения, дающая вероятность нахождения частицы со скоростью $\vec{v}_i$ в клетке $\vec{x}$ в момент времени t . Скорость $\vec{v}_i$ может принимать значение из некоторого конечного множества, зависящего от типа решетки, например $\vec{v}_i = (\cos(2\pi i/6), \sin(2\pi i/6))$ для гексагональной сетки. Функция перехода клеточного автомата в LBM обычно состоит из двух шагов вида:

- 1) Релаксация (также говорят «шаг коллизий»)

$$f_i^t(\vec{x}, t + \delta_t) = f_i(\vec{x}, t) + \frac{1}{\tau}(f_i^{eq} - f_i),$$

где $\vec{x}$ – вектор координат клетки в решетке, f_i^{eq} – локальная функция равновесия, аппроксимирующая распределение Больцмана, τ – время релаксации, δ_t – шаг дискретного времени.

- 2) Распространение потоков:

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta_t, t + \delta_t) = f_i^t(\vec{x}, t + \delta_t).$$

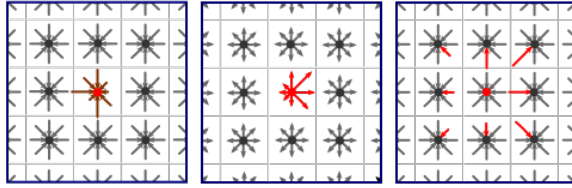


Рис. 1: Тактовое функционирование клеточного автомата для LBM вида D_2Q_9 .

В работе С. Вольфрама [50] рассматривается применение LBM к моделям жидкостей, описываемых уравнениями Навье-Стокса. Отмечу, что в этих моделях применяют автоматы с треугольными, квадратными, шестиугольными и другими ячейками. Общая схема классификации моделей имеет вид D_nQ_m . Здесь D_n – это размерность n решетки, Q_m – количество m соседей для клетки, включая ее саму. Преимуществом данных методов над традиционными методами вычислительной механики является легкость применения параллельных вычислений. Существуют специализированные обзоры таких подходов, составленные специалистами по механике (например, [46]), автору же данного обзора хочется отметить, что именно клеточные автоматы, первоначально описывающие динамику газа, породили многие из моделей поведения толпы.

2.2. Биология и медицина

Биомедицинские многоагентные модели обычно напоминают модели из предыдущего подраздела. В качестве клеток клеточного автомата в модели обычно берутся живые клетки. Например, в статье [8] описан двухмерный клеточный автомат (рис. 2), моделирующий развитие опухоли. В качестве ячеек автомата рассматриваются нормальные и опухолевые клетки, а функция перехода автомата учитывает уровень насыщенности кислородом, близость клетки к сосуду и разное поведение нормальных и раковых клеток. Показывается, что ток крови и неоднородность красных кровяных телец играют главные роли в развитии таких колоний клеток, даже когда красные кровяные тельца проходят через сосуды

в нормальной, здоровой ткани.

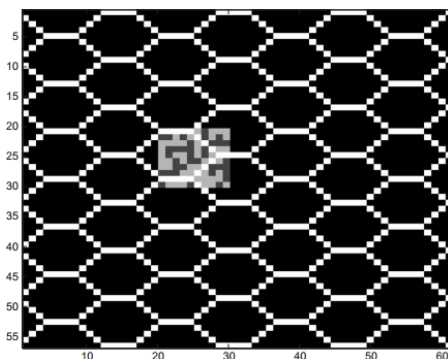


Рис. 2: Начальное распределение элементов клеточного автомата. Черные клетки пустые, белые заняты сосудами, светло-серые – раковыми клетками и темно-серые – нормальными клетками.

Модель роста опухоли в статье [32] также основана на клеточном автомате, подобном вышеупомянутому, но учитывает генетические особенности злокачественных клеток, делающих их нечувствительными к сигналам прекращения роста, выключающими программу клеточной смерти (апоптоза) и т.п.

В статье [33] моделируется процесс функциональной адаптации костной ткани с помощью гибридного (т.е. сочетающего дискретные и непрерывные правила) клеточного автомата, подобного используемым в механике твердого тела.

В статье [16] приведена простая многоагентная модель эпидемии. Модель была предназначена для исследования влияния таких факторов, как начальное количество инфицированных, плотность популяции и максимальное количество клеток, через которое может распространяться инфекция. Далее это направление исследований получило определенную популярность и сейчас существуют агентные модели эпидемии, учитывающие образцы человеческого поведения, полученные из реальных данных, мобильность и т.д., например, [15].

2.3. Неклассические вычисления

Многоагентный подход применяется в неклассических вычислениях, например, в биологических вычислениях. Слизевик *Physarum polycephalum* (гигантское многоядерное одноклеточное существо, рис. 3) часто применяется как модельный организм для биологических вычислений, который может быть запрограммирован различными внешними стимулами. В ответ на эти стимулы он растет, меняет конфигурацию, выпускает ложноножки и т.п. [22], что и кодирует определенные операции над числами, помимо этого слизевик способен к обучению и самообучению. Например, в свое время этот слизевик был использован в качестве системы управления роботом, избегающим света.



Рис. 3: *Physarum polycephalum* на стволе дерева (фотография frankenstoen – flickr, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18930526>).

Существует сайт <http://www.phychip.eu/>, посвященный проекту PhyChip – построению вычислительной системы на основе слизевиков *Physarum*. В статье [21] рассматривается многоагентная среда, симулирующая поведение *Physarum polycephalum*.

Поведение слизевиков привело к созданию моделей движения толпы [13]. Предлагается основанная на клеточном автомате модель *Physarum*, которая имитирует процесса поиска и диффузии пищи, роста организма, создания ложноножек для каждого

организма. При этом выборе оптимального пути эвакуацией толпы соответствует оптимальный выбор ложноножки моделируемого организма *Physarum*.

Также существуют связанные с поведением слизевиков модели из различных видов неклассической логики и теории игр [11, 41, 42]. В статье [40] рассматриваются клеточные автоматы с правилами, меняющимися на каждом ходу. Используя эти автоматы, возможно формализовать рефлексивные игры на основе контекста для k игроков на разных конечных или бесконечных уровнях рефлексии. Каждый игрок имеет собственное правило принятия решения, определяемое логической функцией на своих выигрышах в контексте, который постоянно изменяется. Это правила нулевого уровня рефлексии. Если игрок 1 следует правилу принятия решения, которое является логической комбинацией с решающим правилом игрока 2 нулевого уровня рефлексии, то мы говорим, что правило решения игрока 1 относится к первому уровню. Между тем, если игрок 2 следует правилу принятия решения, которое является логической комбинацией с решающим правилом игрока 1 первого уровня рефлексии, то говорится, что правило решения игрока 2 относится к второму уровню и т.д.

В работе [43] рассматривается роевое поведение алкоголиков с точки зрения неклассической логики. В качестве роев рассматриваются небольшие группы собутыльников.

2.4. Транспорт

Агентные (микроскопические) модели применяются для моделирования транспортных потоков, обычно однополосных. В основе подходов лежит концепция «о желании придерживаться при движении безопасной дистанции до лидера». В монографии [2] приводятся, например, модель оптимальной скорости Нагеля-Шрекенберга, основанная на клеточных автоматах, которая является простейшей. В этой модели на каждом шаге $m \rightarrow m + 1$ состояние всех автотранспортных средств в системе обновляется в соответствии со следующими правилами (здесь $v_n \leq v_{\max}$ – скорость, а s_n – координата n -го транспортного средства):

- 1) Ускорение (отражает тенденцию двигаться как можно быстрее, не превышая максимально допустимую скорость):

$$v_n(m+1) = \min\{v_n(m) + 1, v_{\max}\}.$$

- 2) Торможение (гарантирует отсутствие столкновений с впереди идущими АТС):

$$v_n(m+1) = \min\{v_n(m), s_{n+1}(m) - s_n(m) - d\},$$

где $d \sim 7,5$ м.

- 3) Случайные возмущения (учитывают различия в поведении транспортных средств):

$$v_n(m+1) = \begin{cases} \max\{v_n(m) - 1, 0\}, & \text{с вероятностью } p, \\ v_n(m), & \text{с вероятностью } 1 - p, \end{cases}$$

- 4) Движение:

$$s_n(m+1) = s_n(m) + v_n(m).$$

В работе [24] приводятся модели кратковременной динамики следования за лидером, которые описывают непрерывные задачи обратной связи (ускорение и торможение) и задачи дискретного выбора как ответ на окружающий транспортный поток. Стиль вождения агентов характеризуется параметрами модели – временем реакции, желаемой скоростью и т.п. Также используются переменные внутреннего состояния, соответствующие уму агента, для описания опыта водителя. На поведение водителя действуют соседние транспортные средства и другие внешние воздействия.

2.5. Модели толпы

Предположительно, самая первая работа, описывающая агентный подход к моделированию роя или стаи – это статья Рейнольдса [38]. В ней выделено три основных принципа построения роя:

- избегание столкновений: избегать столкновений с ближайшими соседями по рою,
- совпадение скоростей: пытаться двигаться с той же скоростью, что и ближайшие соседи по рою,
- центрирование по рою: пытаться держаться близко к ближайшим соседям по рою.

Автор предлагал применять вышеизложенные принципы для графического отображения роя частиц, но вскоре они нашли и другие применения.

В работе [23] использован двухмерный клеточный автомат (т.н. world-space cellular automaton, рис. 4, изображение из цитируемой ниже работы Ross Mead) с правилами, близкими к *Game of Life* Конвея, симулирующий образование роя (swarm) агентов с помощью поля социального потенциала. Агенты отталкиваются друг от друга, если слишком сильно приблизятся или притягиваются, если находятся достаточно далеко друг от друга. Сила отталкивания и (или) притяжения между двумя агентами описывается как

$$f(d) = -\frac{c_1}{d^{\alpha_1}} + \frac{c_2}{d^{\alpha_2}},$$

где $c_1, c_2 \geq 0$, $\alpha_1 > \alpha_2 > 0$ – параметры агентов, d – расстояние между агентами. Если агент A обнаруживает соседей $N_1, \dots, N_k$ на расстояниях $d_1, \dots, d_k$, то сила, примененная к агенту i соседом N_i будет

$$f_A(d_i) = -\frac{c_{1i}}{d_i^{\alpha_{1i}}} + \frac{c_{2i}}{d_i^{\alpha_{2i}}}.$$

Суммарная сила, примененная к агенту A будет

$$F(A) = \sum_{i=1}^k f_A(d_i).$$

Предполагалось использование миниатюрных роботов, снабженных сенсорами и системой связи, с таким поведением при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

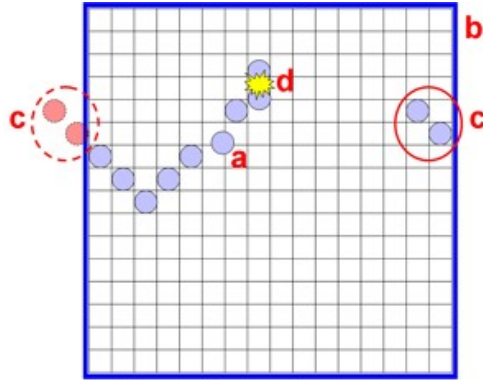


Рис. 4: World-Space Cellular Automata и его ограничения: (a) робот между клетками сетки; (b) граница, окружающая автомат; (c) автомат оборачивается вокруг границы; (d) два робота пытаются занять одну и ту же клетку.

Так вышло, что самая первая работа по моделированию движения группы людей, которую автор настоящего обзора прочел и которая определила его интерес к агентным системам – это статья [4]. В ней применяется клеточный автомат с вероятностной локальной функцией перехода, изначально предложенный для моделирования динамики газов, для построения модели движения неорганизованной группы людей между препятствиями, например, – между ограждениями в метро.

Следует отметить, что в России сложилась своя собственная школа математического моделирования поведения толпы и упомянуть в связи с этим монографию [1], посвященную математическим моделям управления толпой, поведение которой описывается как пороговое (конформное) коллективное принятие решений ее элементами.

2.6. Управление строем

Стоит отметить, что для данного направления характерно, что одни и те же результаты используются и для моделирования строя агентов на компьютере, и для проектирования искусственного интеллекта наземных роботов и БПЛА.

В работах [29, 10, 27, 28] и других того же коллектива авторов описан алгоритм, позволяющий организовывать строй (formation) агентов, определенный с помощью одной или нескольких математических функций. Формация агентов рассматривается как одномерный клеточный автомат (т.н. robot-space cellular automaton), каждая клетка которого содержит координаты агента на плоскости, его реальное и желаемое взаимное расположение с соседними агентами (см. рис. 5).

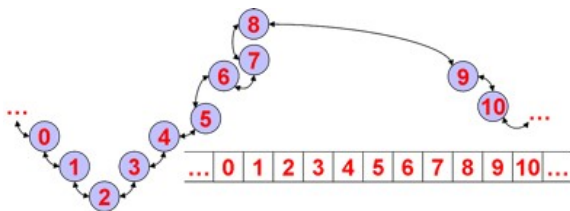


Рис. 5: Роботы как ячейки в одномерном клеточном автомате пространства роботов (Robot-Space Cellular Automaton).

Каждый агент (робот) представим клеткой c_i одномерного клеточного автомата. Каждая клетка имеет окрестность $\{c_{i-1}, c_i, c_{i+1}\}$. Пусть желаемая формация задана функцией $f(x)$, которая известна одному из агентов c_{seed} и каждый агент c_i знает свои координаты p_i . *Желаемое отношение* $r_{i \rightarrow j, des}$ между c_i и c_j определяется как вектор с началом в p_i и концом в точке пересечения $f(x)$ и окружности радиуса R с центром в p_i , R – это желаемое расстояние между агентами. Используя данные сенсоров, агент выясняет *действительное отношение* $r_{i \rightarrow j, act}$. Данные о желаемой формации, заданной через $f(x)$, распространяются локально от c_{seed} к соседям и от них далее. Все агенты вычисляют свои желаемые и действительные отношения с соседями и движутся таким образом, чтоб минимизировать $\|r_{i \rightarrow j, des} - r_{i \rightarrow j, act}\|$. Агенты (наземные роботы) могут сохранять как уже созданный строй, так и создавать новый. Демонстрируется работа алгоритма на примере колесных роботов, распознающих друг друга по цветным штрих-кодам и общающихся по радиосети XBee.

В работе [17] для решения сходной проблемы применен иной

подход. Желаемый строй агентов задан графом и задача построения строя сводится к деформации взвешенного графа, описывающего исходное расположение агентов, к желаемому виду, с учетом ограничений по возможностям связи агентов друг с другом (6). При этом необходим поиск изоморфизма между желаемым и существующим графом строя. Координаты агентов с номером i задаются как обыкновенное дифференциальное уравнение вида

$$\dot{q}_i = u_i,$$

где q_i – координаты агента, а u_i – его скорость, являющаяся в данном случае управлением.

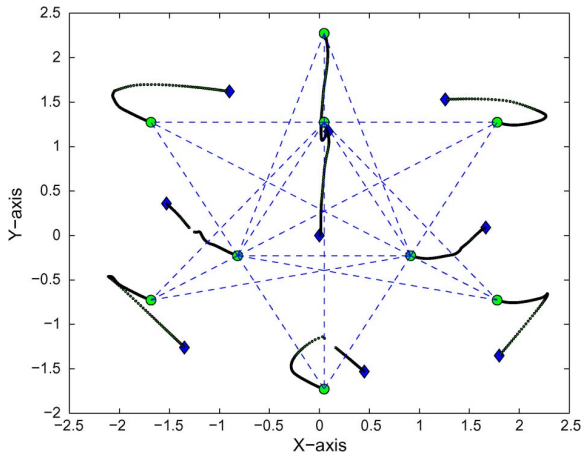


Рис. 6: Траектории агентов, занимающих желаемое положение.

Статья [6] описывает построение строя роботов во многом аналогично ранее цитированной статье, однако, предлагаемый в работе подход корректно обрабатывает ситуации возможной поломки, присоединения новых агентов к строю и смены положения цели, работоспособность подхода проверена при помощи компьютерного моделирования. Также проанализирована работа алгоритма в условиях введения ошибки измерений и при наличии препятствий.

Работа [51] описывает построение такого строя БПЛА, который позволял бы поддерживать сеть связи БПЛА в максимально связном состоянии. Положения агентов задаются системой дифференциальных уравнений и задача рассматривалась с точки зрения теории устойчивости.

Довольно большой обзор по задачам построения строя приведен в [34].

2.7. Модели системы связи

В этом направлении существуют два (возможно пересекающихся) класса агентных моделей. Один из них описывает построение реального протокола связи внутри телекоммуникационной сети, а второй – предназначен для компьютерных симуляций телекоммуникационных сетей.

В одном из ранних обзоров [49] перечисляются различные многоагентные модели построения сетей связи. В качестве агентов рассматриваются, естественно, сами узлы телекоммуникационной сети (см. рис. 7), при этом для таких агентов также может применяться модель BDI. Приводятся примеры распределенного и децентрализованного управления сетью, муравьиных алгоритмов маршрутизации и прочие решения, основанные на агентном подходе. Многие из них сохраняют актуальность и развиваются и по сей день.

В статье [30] было, вероятно, впервые описано применение многоагентного подхода к моделированию сети связи. В статье указывалось, что такие традиционные модели телекоммуникационной сети, как теория очередей, сети Петри или как исчисление процессов, не вполне подходят для представления мобильных сетей или основанных на применении политик (policy-based) сетей, так как приводят к сложным и трудноразрешимым уравнениям, игнорируют индивидуальное поведение узлов и требуют задания ограниченного числа возможных состояний сети. Моделировалась система связи с сообщениями трех классов по QoS и пятью типами поведения узлов, включающими поведение узлов с динамической и статической маршрутизацией, а также разными

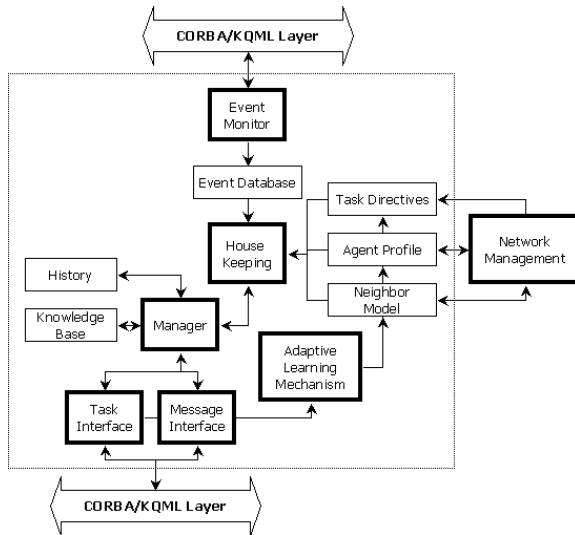


Рис. 7: Пример структуры агента телекоммуникационной сети.

способами построения очереди сообщений.

В связи с появлением концепции «интернета вещей» много-агентные системы как основа для разработки [31] и моделирования [9] сети связи становятся все более актуальными. В этом случае реальным прототипом агентов являются смартфоны, встраиваемые сетевые устройства и т.п., оснащенные специальными программными компонентами, позволяющими отображать в Web данные, задачи и службы всей системы агентов.

В работе [3] решается задача, во многом аналогичная задаче построения строя агентов, однако в ней с помощью графа задается не пространственные взаимоотношения между агентами, а желаемая форма сети связи. Агенты, обмениваясь сообщениями о фрагментах желаемой системы связи, организуют каналы связи со своими соседями в соответствии с полученными данными так, чтоб разница между желаемым и возможным для построения фрагментом графа связи была минимальным.

2.8. Модели боевых действий

Многоагентные модели применяются при моделировании боевых действий, особенно современных локальных конфликтов (т.н. *stability operations*), для которых оказались не применимыми традиционные модели, оперирующие, главным образом, некоторыми интегральными показателями для больших военных соединений. С конца 1990-х – начала 2000 гг. получили определенную известность среды моделирования конфликта ISAAC и EINStein, разработка US Marine Corps Combat Development Command. В монографии [20] дано подробное описание алгоритмов и интерфейсов вышеуказанных систем, а также исследованы различные феномены типа самоорганизующейся тактики агентов.

Также известны, например, модель Map Aware Non-uniform Automata (MANA), разработанная Operations Analysis group в Defence Technology Agency (DTA), Новая Зеландия или же Pythagoras – разработка Marine Corps Warfighting Laboratory министерства обороны США [39, 37]. Кроме того, конфликты моделируют и в средах агентного моделирования общего назначения типа NetLogo.

Помимо упомянутых систем, автором настоящего обзора была разработана программа моделирования движения и боевых действий иерархически организованных агентов «Бокоход» (номер свидетельства о государственной регистрации Роспатентом 2016615934), которая имела в своей основе алгоритм, близкий к описанному в [20]. Данный алгоритм изложен в работе [26], и, в отличие от ранее упомянутых алгоритмов ISAAC, сфокусирован, главным образом, на конфликте агентов в условиях неизвестного и, возможно, постоянно изменяющегося окружения, состоящего из ячеек разной степени проходимости. Для этой цели в программе «Бокоход» реализован поиск локально-оптимальных маршрутов агентов. Также используется особый математический формализм, в котором агент не является отдельной от среды сущностью, а является частью состояния ячейки *world-space cellular automaton*, моделирующего окружающую среду. В результате этого достигается определенный прирост производительности про-

граммы. При этом если имеется несколько агентов, претендующих на одну ячейку, ячейка разыгрывается между ними по определенному алгоритму.

2.9. Социально-экономические науки

Наконец, многоагентное моделирование применяется и в социально-экономических науках. Применение таких моделей в экономике стало распространено, по всей вероятности, после мирового финансового кризиса 2008 г., как утверждает в монографии [18]. Преимущество агентного моделирования в том, что оно хорошо отражает сложность взаимоотношений различных людей, домохозяйств и фирм в динамике. Агентное моделирование позволяет непосредственно связать микроуровень и макроэкономическую ситуацию и не требует равновесия экономической системы.

При этом следует отметить, что обзорные статьи на тему применения агентного моделирования в экономике появились намного раньше, как, например статья [35], изданная в виде отчета еще в 2005 г.

Агентные модели используются и для описания социальных сетей, как естественно и давно существующих в обществе, так и для компьютерных социальных сетей. Например, работа [7] предлагает многоагентную модель добавления «друзей» в социальной сети Facebook, построенную по результатам анализа данных студентов Калифорнийского технологического института (Caltech).

3. Заключение

Подытожим, что многоагентные системы можно условно поделить на

- 1) системы с непрерывными и дискретным временем,
- 2) системы агентов на сетке и в обычном евклидовом пространстве (и, возможно, в других топологических пространствах),

- 3) системы, в которых агенты перемещаются по некоторому пространству и системы, в которых пространство состоит исключительно из агентов.

В некоторых случаях, из дискретных агентных моделей могут в пределе получаться соответствующие непрерывные, хотя в общем случае это не очевидно. Можно видеть, что некоторые модели пришли из биологии, но стали затем использоваться для производства вычислительной техники, другие модели заимствованы из механики, но нашли широкое применение в моделировании социально-экономических процессов. Это показывает некую глубинную общность, присутствующую во всех сложных системах, универсальность неприменимости самоорганизации в самых разных науках.

Далее автор планирует продолжить свой обзор многоагентных технологий и провести сравнение основных языков описания агентных моделей и средств моделирования.

Литература

1. БРЕЕР В.В., НОВИКОВ Д.А., РОГАТКИН А.Д. Управление толпой: математические модели порогового коллективного поведения. — Москва : Ленанд. — 168 с.
2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А.В. Гасников, С. Л. Кленов, Е. А. Нурминский и др. — Москва : МЦНМО. — 427 с.
3. КУЗНЕЦОВ А. В. Распределение ограниченных ресурсов в системе с устойчивой иерархией (на примере перспективной системы военной связи) // УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ. — 2017. — Т. 66. — С. 68–93.
4. МАЛИНЕЦКИЙ Г. Г., СТЕПАНЦОВ М. Е. Применение клеточных автоматов для моделирования движения группы людей // Ж. ВЫЧИСЛ. МАТЕМ. И МАТЕМ. ФИЗ. — 2004. — Т. 44, № 11. — С. 2094–2098.
5. Метод подвижных клеточных автоматов как новое направление дискретной вычислительной механики. I. Тео-

- ретическое описание / С.Г. Псахье, Г.П. Остермайер, А.И. Дмитриев и др. // ФИЗИЧЕСКАЯ МЕЗОМЕХАНИКА. — 2000. — Т. 3, № 2. — С. 5–13. — URL: <http://www.ispms.ru/ru/journals/290/459/>.
6. МОРОЗОВА Н.С. Децентрализованное управление движением строя роботов при динамически изменяющихся условиях // ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЕКТ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ. — 2015. — Т. 1. — С. 65 – 74.
 7. ABBAS SYED MUHAMMAD ALI. An agent-based model of the development of friendship links within Facebook // COMPUTATIONAL AND MATHEMATICAL ORGANIZATION THEORY. — 2013. — Jun. — Vol. 19, no. 2. — P. 232–252. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10588-013-9156-z>.
 8. ALARCÓN T., BYRNE H.M., MAINI P.K. A cellular automaton model for tumour growth in inhomogeneous environment // JOURNAL OF THEORETICAL BIOLOGY. — 2003. — Vol. 225, no. 2. — P. 257 – 274. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022519303002443>.
 9. BATOOL KOMAL, NIAZI MUAZ A. Modeling the internet of things: a hybrid modeling approach using complex networks and agent-based models // COMPLEX ADAPTIVE SYSTEMS MODELING. — 2017. — Mar. — Vol. 5, no. 1. — P. 4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1186/s40294-017-0043-1>.
 10. BEER BRENT, MEAD ROSS, WEINBERG JERRY B. A Distributed Method for Evaluating Properties of a Robot Formation // Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2010, Atlanta, Georgia, USA, July 11-15, 2010. — 2010. — URL: <http://www.aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI10/paper/view/1677>.
 11. Bio-Inspired Game Theory: The Case of Physarum Polycephalum / Andrew Schumann, Krzysztof Pancerz, Andrew Adamatzky, Martin Grube // 8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies, BICT 2014, Boston, MA, USA, December 1-3, 2014. — 2014. — URL: <https://doi.org/10.4108/icst.bict.2014.257869>.

12. BORSHCHEV ANDREI, FILIPPOV ALEXEI. From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools // The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. July 25 - 29, 2004, Oxford, England / Ed. by editor. — 2004.
13. Cellular automaton model of crowd evacuation inspired by slime mould / Vicky S. Kalogeiton, Dim P. Papadopoulos, Ioannis Georgilas et al. // INT. J. GENERAL SYSTEMS. — 2015. — Vol. 44, no. 3. — P. 354–391. — URL: <https://doi.org/10.1080/03081079.2014.997527>.
14. FERBER J. Les Systèmes multi-agents: vers une intelligence collective. I.I.A. Informatique intelligence artificielle. — InterEditions, 1995. — ISBN: 9782729605728. — URL: <https://books.google.ru/books?id=R7VBAAAACAAJ>.
15. FRIAS-MARTINEZ E., WILLIAMSON G., FRIAS-MARTINEZ V. An Agent-Based Model of Epidemic Spread Using Human Mobility and Social Network Information // 2011 IEEE Third International Conference on Privacy, Security, Risk and Trust and 2011 IEEE Third International Conference on Social Computing. — 2011. — Oct. — P. 57–64.
16. GORDON THEODORE J. A simple agent model of an epidemic // TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE. — 2003. — Vol. 70, no. 5. — P. 397 – 417. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162502003232>.
17. Graph Matching-Based Formation Reconfiguration of Networked Agents With Connectivity Maintenance / Z. Kan, L. Navaravong, J. M. Shea et al. // IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL OF NETWORK SYSTEMS. — 2015. — March. — Vol. 2, no. 1. — P. 24–35.
18. HAMILL LYNNE, GILBERT NIGEL. Agent-Based Modelling in Economics. — 1st edition. — Wiley Publishing, 2016. — P. 256. — ISBN: 1118456076, 9781118456071.
19. IGLESIAS CARLOS A., GARIJO MERCEDES, GONZÁLEZ JOSÉ C. A Survey of Agent-Oriented Methodologies // Intelligent Agents V: Agents Theories,

- Architectures, and Languages: 5th International Workshop, ATAL'98 Paris, France, July 4–7, 1998 Proceedings / Ed. by Jörg P. Müller, Anand S. Rao, Munindar P. Singh. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1999. — P. 317–330. — ISBN: 978-3-540-49057-9. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-49057-4_21.
20. ILACHINSKI ANDREW. Artificial War: Multiagent-Based Simulation of Combat. — Singapore : World Scientific Publishing Company, 2004. — P. 747.
 21. JONES JEFF. Applications of multi-agent slime mould computing // IJPEDS. — 2016. — Vol. 31, no. 5. — P. 420–449. — URL: <https://doi.org/10.1080/17445760.2015.1085535>.
 22. JONES JEFF, MAYNE RICHARD, ADAMATZKY ANDREW. Representation of shape mediated by environmental stimuli in Physarum polycephalum and a multi-agent model // IJPEDS. — 2017. — Vol. 32, no. 2. — P. 166–184. — URL: <https://doi.org/10.1080/17445760.2015.1044005>.
 23. JONES M.P., DUDENHOEFFER D.D. A formation behavior for large-scale micro-robot force deployment // Winter Simulation Conference. — Vol. 01. — Los Alamitos, CA, USA : IEEE Computer Society, 2000. — P. 972–982.
 24. KESTING ARNE, TREIBER MARTIN, HELBING DIRK. Agents for Traffic Simulation. — URL: <https://arxiv.org/pdf/0805.0300.pdf>.
 25. KRAVARI KALLIOPI, BASSILIADES NICK. A Survey of Agent Platforms // JOURNAL OF ARTIFICIAL SOCIETIES AND SOCIAL SIMULATION. — 2015. — Vol. 18, no. 1. — URL: <http://EconPapers.repec.org/RePEc:jas:jasssj:2014-71-2>.
 26. KUZNETSOV A. V. A simplified combat model based on a cellular automaton // JOURNAL OF COMPUTER AND SYSTEMS SCIENCES INTERNATIONAL. — 2017. — May. — Vol. 56, no. 3. — P. 397–409. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S106423071703011X>.
 27. LONG ROBERT LOUIS, MEAD ROSS,

- WEINBERG JERRY B. Distributed Auction-Based Initialization of Mobile Robot Formations // Proceedings of the Twenty-Fourth AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2010, Atlanta, Georgia, USA, July 11-15, 2010. — 2010. — URL: <http://www.aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI10/paper/view/1673>.
28. MEAD ROSS, WEINBERG JERRY B. 2-Dimensional Cellular Automata Approach for Robot Grid Formations // Proceedings of the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence, AAAI 2008, Chicago, Illinois, USA, July 13-17, 2008. — 2008. — P. 1818–1819. — URL: <http://www.aaai.org/Library/AAAI/2008/aaai08-299.php>.
29. MEAD ROSS, WEINBERG JERRY B. A Single- and Multi-Dimensional Cellular Automata Approach to Robot Formation Control // Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-08). — 2008. — URL: http://robotics.usc.edu/rossmead/docs/2008/2008WeinbergMead_ICRA08.pdf.
30. MERGHEM LEÏLA, LECARPENTIER HUGUES. Agents: A Solution for Telecommunication Network Simulation // Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility: IFIP TC6 / WG6.2 & WG6.7 Conference on Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility (Net-Con 2002) October 23–25, 2002, Paris, France / Ed. by Dominique Gaïti, Nadia Boukhatem. — Boston, MA : Springer US, 2003. — P. 165–176. — ISBN: 978-0-387-35620-4. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-35620-4_14.
31. Mobile Agents for Integration of Internet of Things and Wireless Sensor Networks / T. Leppänen, M. Liu, E. Harjula et al. // 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. — 2013. — Oct. — P. 14–21.
32. MONTEAGUDO ÁNGEL, SANTOS JOSÉ. A Cellular Automaton Model for Tumor Growth Simulation // 6th International Conference on Practical Applications of Computational Biology & Bioinformatics / Ed. by Miguel P. Rocha, Nicholas Luscombe, Florentino Fdez-

- Riverola, Juan M. Corchado Rodríguez. — Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. — P. 147–155. — ISBN: 978-3-642-28839-5. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-28839-5_17.
33. NARVÁEZ CARLOS A., TOVAR ANDRÉS, GARZÓN DIEGO A. Topology Synthesis of Compliant Mechanisms Using the Hybrid Cellular Automaton Method with an Efficient Mass Control Strategy // III European Conference on Computational Mechanics: Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering: Book of Abstracts / Ed. by C. A. Motasoaes, J. A. C. Martins, H. C. Rodrigues et al. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2006. — P. 490–490. — ISBN: 978-1-4020-5370-2. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-5370-3_490.
34. OH KWANG-KYO, PARK MYOUNG-CHUL, AHN HYOSUNG. A survey of multi-agent formation control // AUTOMATICA. — 2015. — Vol. 53. — P. 424 – 440. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109814004038>.
35. PYKA ANDREAS, FAGIOLO GIORGIO. Agent-based Modelling: A Methodology for Neo-Schumpeterian Economics // Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics. — Edward Elgar Publishing, 2007. — URL: http://EconPapers.repec.org/RePEc:elg:eechap:2973_29.
36. RAO ANAND S., GEORGEFF MICHAEL P. BDI Agents: From Theory to Practice // Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems. — 1995. — P. 312–319.
37. Recent Developments in the MANA Agent-based Model / Gregory C. McIntosh, David P. Galligan, Mark A. Anderson, Michael K. Lauren // SCYTHE : PROCEEDINGS AND BULLETIN OF THE INTERNATIONAL DATA FARMING COMMUNITY. — 2003. — no. 1. — P. 38 – 39. — URL: <https://harvest.nps.edu/scythe/Issue1/IDFW13-Scythe-Mana.pdf>.
38. REYNOLDS CRAIG W. Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model // SIGGRAPH COMPUT.

- GRAPH. — 1987. — Aug. — Vol. 21, no. 4. — P. 25–34. — URL: <http://doi.acm.org/10.1145/37402.37406>.
39. ROSS JUSTIN L. A Comparative Study of Simulation Software for Modeling Stability Operations. — 2012. — URL: <https://ccl.northwestern.edu/papers/2012/ross.pdf>.
40. SCHUMANN ANDREW. Payoff Cellular Automata and Reflexive Games // J. CELLULAR AUTOMATA. — 2014. — Vol. 9, no. 4. — P. 287–313. — URL: <http://www.oldcitypublishing.com/journals/jca-home/jca-issue-contents/jca-volume-9-number-4-2014/jca-9-4-p-287-313/>.
41. SCHUMANN ANDREW. Go games on plasmodia of physarum polycephalum // 2015 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, FedCSIS 2015, Łódź, Poland, September 13-16, 2015. — 2015. — P. 615–626. — URL: <https://doi.org/10.15439/2015F236>.
42. SCHUMANN ANDREW. Towards Context-Based Concurrent Formal Theories // PARALLEL PROCESSING LETTERS. — 2015. — Vol. 25, no. 1. — URL: <https://doi.org/10.1142/S0129626415400083>.
43. SCHUMANN ANDREW, FRIS VADIM. Swarm Intelligence among Humans - The Case of Alcoholics // Proceedings of the 10th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC 2017) - Volume 4: BIOSIGNALS, Porto, Portugal, February 21-23, 2017. — 2017. — P. 17–25. — URL: <https://doi.org/10.5220/0006106300170025>.
44. SIMON HERBERT A. The Architecture of Complexity // Facets of Systems Science. — Boston, MA : Springer US, 1991. — P. 457–476. — ISBN: 978-1-4899-0718-9. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4899-0718-9_31.
45. STONE PETER, VELOSO MANUELA. Multiagent Systems: A survey from a machine learning perspective // AUTONOMOUS ROBOTS. — 2000. — July. — Vol. 8, no. 3. — P. 345–383.
46. SUCCI S. The Lattice Boltzmann Equation: For

- Fluid Dynamics and Beyond. Numerical Mathematics and Scientific Computation. — Clarendon Press, 2001. — P. 288. — ISBN: 9780198503989. — URL: https://books.google.ru/books?id=OC0Sj_xgnhAC.
47. A Survey of Programming Languages and Platforms for Multi-Agent Systems. / Rafael H. Bordini, Lars Braubach, Mehdi Dastani et al. // INFORMATICA (SLOVENIA). — 2006. — Vol. 30, no. 1. — P. 33–44. — URL: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/informaticaSI/informaticaSI30.html>.
48. A Survey on Parallel and Distributed Multi-Agent Systems / Alban Rousset, Bénédicte Herrmann, Christophe Lang, Laurent Philippe // Euro-Par 2014: Parallel Processing Workshops - Euro-Par 2014 International Workshops, Porto, Portugal, August 25-26, 2014, Revised Selected Papers, Part I. — 2014. — P. 371–382. — URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-14325-5_32.
49. TSATSOU LIS COSTAS, KIAT SOH LEEN. Intelligent Agents in Telecommunication Networks // in Computational Intelligence in Telecommunications Networks. — CRC Press, 2000. — P. 23–28.
50. WOLFRAM STEPHEN. Cellular automaton fluids 1: Basic theory // JOURNAL OF STATISTICAL PHYSICS. — 1986. — Nov. — Vol. 45, no. 3. — P. 471–526. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01021083>.
51. A cooperative formation control strategy maintaining connectivity of a multi-agent system / Rajdeep Dutta, Liang Sun, Mangal Kothari et al. // 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, September 14-18, 2014. — 2014. — P. 1189–1194. — URL: <https://doi.org/10.1109/IROS.2014.6942708>.

THE SHORT REVIEW OF MULTI-AGENT MODELS

Alexander Kuznetsov, Voronezh State University, Voronezh,
Cand.Sc., associate professor (avkuz@bk.ru).

Abstract: The article is devoted to the review of various fields of application of multi-agent systems. Examples of multi-agent models of different types in mechanics, biology, transport, telecommunications, simulation of robots' swarms and formations, and in the economics are considered.

Keywords: agent-based modeling, autonomous agents, multi-agent systems.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...*

*Поступила в редакцию ...
Дата опубликования ...*