

УДК 519.876

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ

А. В. Кузнецов

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 19.06.2018 г.

Аннотация. В статье исследованы модели описания и оценки эффективности самоорганизующихся и самовосстанавливающихся *ad hoc* сетей связи подвижных объектов, управления самоорганизующимся строем роботов, конфликта иерархически организованных групп агентов. В качестве математического аппарата используются многоагентные модели и клеточные автоматы. В частности, модель движения и связи агентов описывается в виде двух соединенных клеточных автоматов. Продемонстрирована связь предлагаемых моделей с некоторыми моделями в виде дифференциальных уравнений. Описаны особенности решаемых задач, структура модели, примеры получаемых числовых характеристик, возможные приложения.

Ключевые слова: модель движения, модель связи, модель конфликта, интеллектуальные агенты, клеточный автомат.

Annotation. The article considers the development of models for describing and evaluating the effectiveness of self-organizing and self-repairing *ad hoc* mobile communication networks, the control of the self-organizing robotic system, and a conflict of hierarchically organized groups of agents. As a mathematical apparatus, multi-agent models and cellular automata are used. In particular, the model of agents' motion and communication is described as two connected cellular automata. We demonstrate the relationship of proposed models with some models in the form of differential equations. Also, we describe the structure of the model and obtain the features of the problems being solved, examples of numerical characteristics, as well as possible applications.

Keywords: model of motion, communication model, conflict model, intelligent agents, cellular automaton.

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика самоорганизующихся и самовосстанавливающихся *ad hoc* сетей связи подвижных объектов, управления самоорганизующимся строем роботов, разработка программного обеспечения для поддержки принятия решений при проведении тактических операций в ходе локальных конфликтов имеет несомненное научное и практическое значение и широко разрабатывается в странах Западной Европы и США, например, при поддержке Управления перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США [1].

Такая модель часто основана на абстракции, в которой воинским формированиям того или иного уровня соответствуют совместно перемещающиеся агенты соответствующего уровня. Время перемещения агентов дискретно, перемещаются они на фиксированный и зависящий от вида агента промежуток за один такт дискретного времени. Каждый агент обладает определенным искусственным интеллектом, позволяющим самостоятельно принимать решения по атаке, отступлению, обходу препятствий.

Помимо этого, разработанная автором многоагентная система может применяться для моделирования движения насекомых, микроорганизмов, системы кровообращения и т. п. Например, агентам могут соответство-

вать эритроциты, перемещающиеся по загроможденному разными препятствиями руслу кровеносной системы.

Неполный перечень исследований в этих, смежных и даже в совершенно неожиданных областях приведен в обзоре [2]. Настоящая работа подытоживает исследования автора в этой области и описывает разработанный им инструментарий для формализации и постановки задач в вышеуказанных областях. Ранее автор описывал в своих статьях модели движения, конфликта [3–5] и связи агентов [6–8], а также некоторые закономерности в этих моделях [9–11]. Также автором было разработано соответствующее программное обеспечение «Психоход» [12].

Была разработана формализованная модель подвижных агентов (роботов, БПЛА, солдат), обменивающихся информационными сообщениями и командами по мобильной сети связи и стремящихся двигаться оптимальным образом в соответствии с заданными критериями.

Автор начал свои работы по построению формальной модели системы связи иерархических групп агентов с разными типами устройств в работе [13]. В качестве практического применения, автор разработал методы самоорганизации сетей мобильной связи на основе предлагаемых алгоритмов и соответствующие средства связи, в том числе и для автоматической организации сетей закрытой связи [14, 15]. Также, разработанная автором модель движения агентов модель нашла применение в алгоритме квазиоптимального размещения радиоэлектронного оборудования на борту воздушного судна [16]. Здесь борт самолета представлялся в виде набора ячеек, а устройства-агенты самостоятельно переходили друг к другу, чтоб организовать кластеры устройств, обладающих определенным средством.

1. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Автором была разработана модель движения и взаимодействия системы агентов, которая представляет инструментарий, позволяющий моделировать поведение сложно

организованных групп на местности с заданным количеством случайных препятствий разных типов.

С математической точки зрения, модель представляет собой два связанных между собой клеточных автомата. Можно считать эти автоматы как двумерными решетками, по которым перемещаются автономные агенты (т. н. World-state cellular automaton), так и одномерными автоматами, в которых окрестность задается исходя из необходимости поддержания строя между агентами (Robot-state cellular automaton). В первом случае ячейке автомата в определенной мере соответствует квадрат на местности, в котором может находиться агент, препятствие и т. п., во втором – ячейкой является сам агент, а в параметры ячейки входят текущие координаты агента, свойства местности, в которой находится агент и т. п.

Концептуально модель состоит из подсистем, показанных на рис. 1.

Остановимся подробнее на схеме подсистем модели.

Библиотека агентов — это совокупность алгоритмов, моделирующих поведение и свойства агентов, включая наборы заранее заготовленных агентов с заданными свойствами. В нее входят подсистемы движения, взаимодействия и связи агентов, а также подсистема управления целями и намерениями агентов.

В **подсистему движения** (которая основана на клеточном автомате), входят:

1. алгоритмы поиска наиболее быстрого маршрута – включая стандартные алгоритмы поиска на графах, типа алгоритма Дейкстры, и разные эвристические алгоритмы применяемые на не вполне разведанных агентом местностях,

2. алгоритмы избегания коллизий агентов, которые необходимы для обеспечения пропуска агентами друг друга в узких местах и алгоритмы предсказания поведения агентов, которые нужны для организации строя и предупреждения сгущивания агентов в одном месте,

3. алгоритмы поддержания строя, которые позволяют агентам самоорганизовываться в определенные формации.

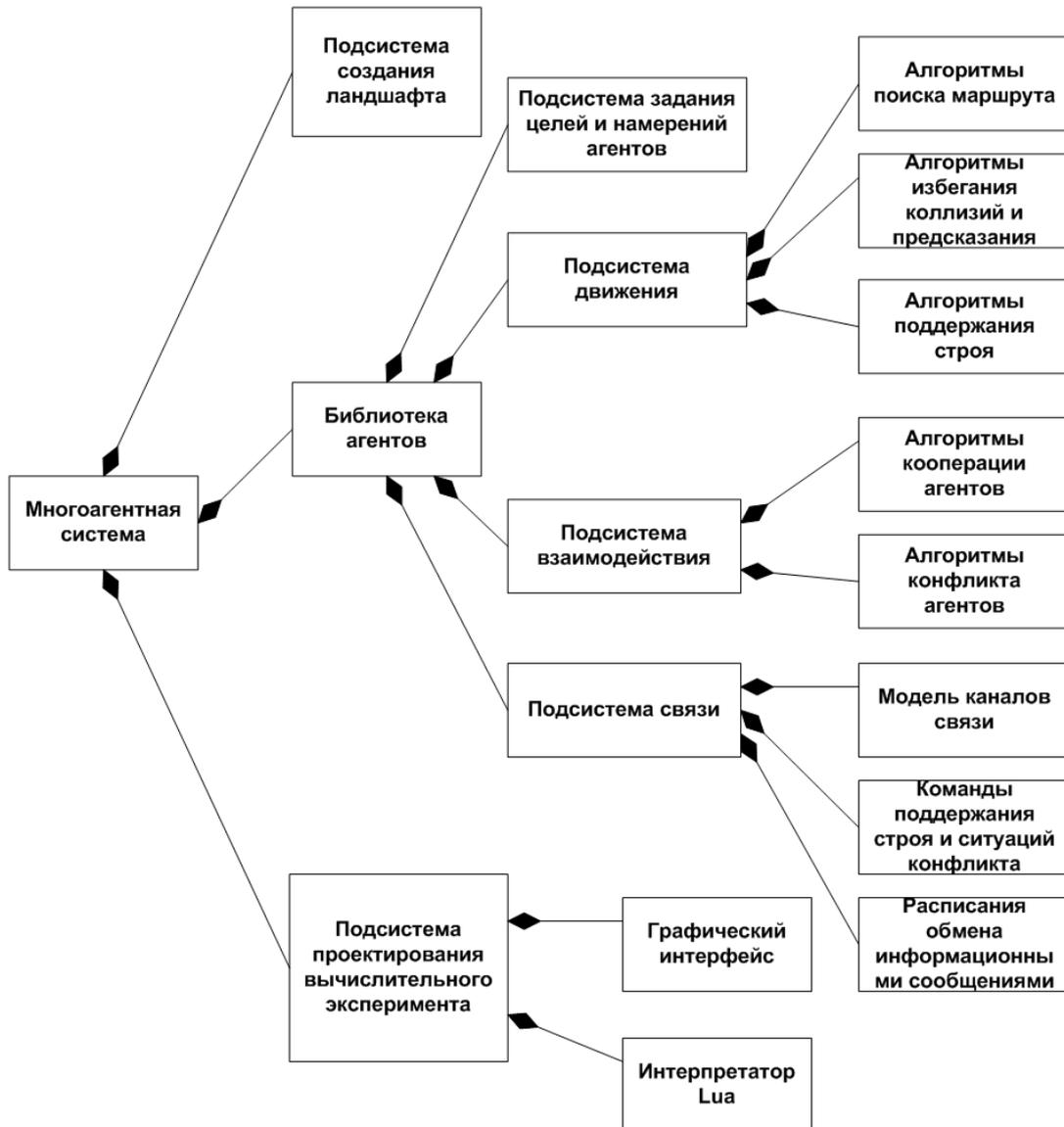


Рис. 1. Схема многоагентной системы

В подсистему взаимодействия агентов входят

4. алгоритмы кооперации агентов по разведке территории, в которых агенты при принятии решений руководствуются информацией, полученной другими агентами,

5. механизмы конфликта агентов разных типов, влекущие уничтожение противоборствующих агентов.

Подсистема связи агентов состоит из

6. расписаний обмена информационными сообщениями – для моделирования сетевого трафика, агенты рассылают сообщения в установленные моменты времени,

7. передачи команд, предназначенных для поддержания строя и обработки ситуаций

конфликта – агенты призывают себе помощь, подают сигнал отступления и т. п.,

8. модели каналов связи, в которой моделируется потеря пакетов данных под действием помех.

Подсистема создания ландшафта состоит из различных алгоритмов, предназначенных для случайной расстановки препятствий и моделирования местностей с заданными свойствами.

Подсистема проектирования вычислительного эксперимента состоит из различных средств автоматизации работы с агентами, включая модуль интерпретатора скриптового языка Lua и графический интерфейс.

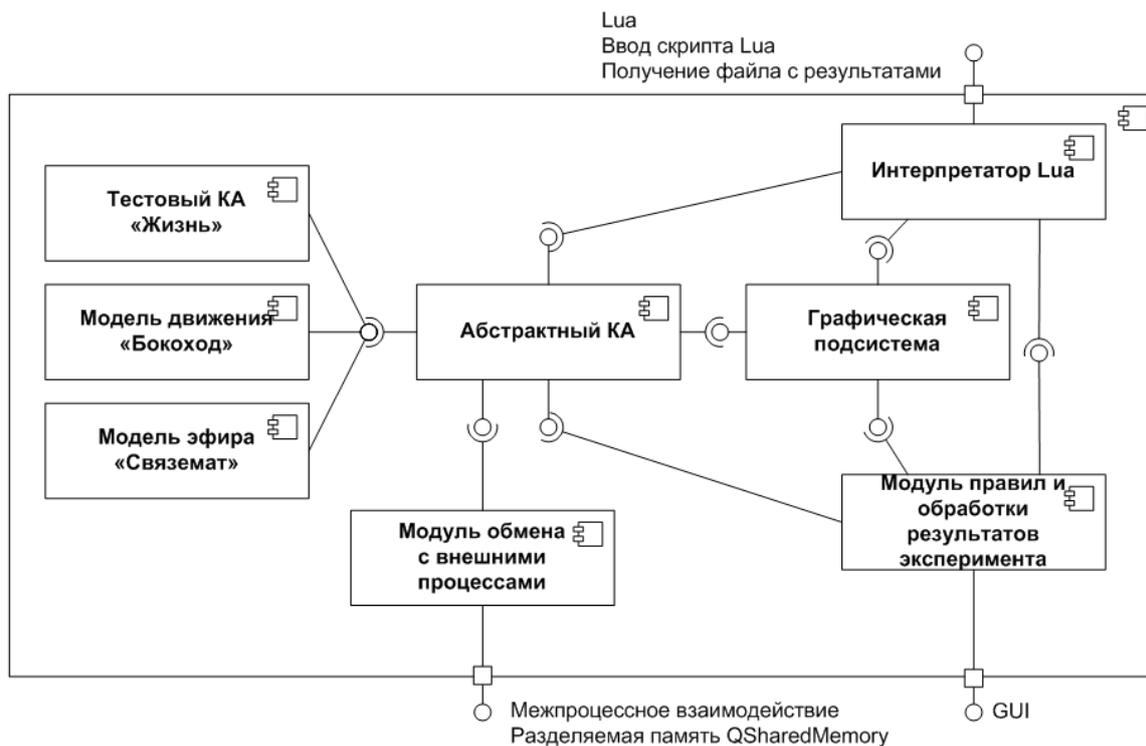


Рис. 2. Диаграмма компонентов среды «Психоход»

Указанная модель системы связи мобильных агентов, соединенная с моделью движения, реализована в программной среде «Психоход» на языке C++14. Диаграмма компонентов UML для разработанной автором программной среды многоагентного моделирования «Психоход» показана на рис. 2. Сценарий конкретного эксперимента, определяющий тип ландшафта, поведения агентов, их вид, иерархию, цели и задачи и т. п. задается, как правило в виде скрипта на языке Lua, загружаемого через встроенный в среду интерпретатор языка Lua или, в простых случаях, с помощью графического интерфейса пользователя. Ход эксперимента выводится на экран и (или) в текстовый файл в соответствии с настройками. Количество клеточных автоматов, поддерживаемых средой, неограниченно расширяемо, так как все остальные подсистемы среды взаимодействуют с автоматом не напрямую, а через интерфейсный абстрактный клеточный автомат самого общего вида.

Следует уточнить, что в предлагаемой модели присутствуют несколько видов агентов и несколько типов взаимодействия. Агенты (см. рис. 3) могут быть как абстракциями неких сущностей (агенты I рода), движущихся

по «географической» местности, так и принадлежащими этим сущностям абстракциями средств связи (агенты II рода). На рисунке показаны группы противоборствующих агентов I рода. Видно, что один агент I рода может «обладать» несколькими агентами II рода.

Взаимодействие агентов I рода включает следующие типы:

1. Агенты могут, намеренно или нет, блокировать движение других агентов.
2. Агенты могут уничтожать друг друга, руководствуясь определенной внутренней логикой.
3. Агенты призывают союзных агентов к себе в случае конфликта.
4. Агенты обмениваются сообщениями, имитирующими трафик телекоммуникационной сети.

Взаимодействие агентов II рода включает два типа:

1. Построение сети связи в соответствии с заданным образцом.
2. Самоорганизация сети связи по типу сегрегации (модель Шеллинга типа II).

Агенты обладают внутренней памятью и являются рефлексивными BDI агентами. Иначе говоря, каждый агент хранит внутри

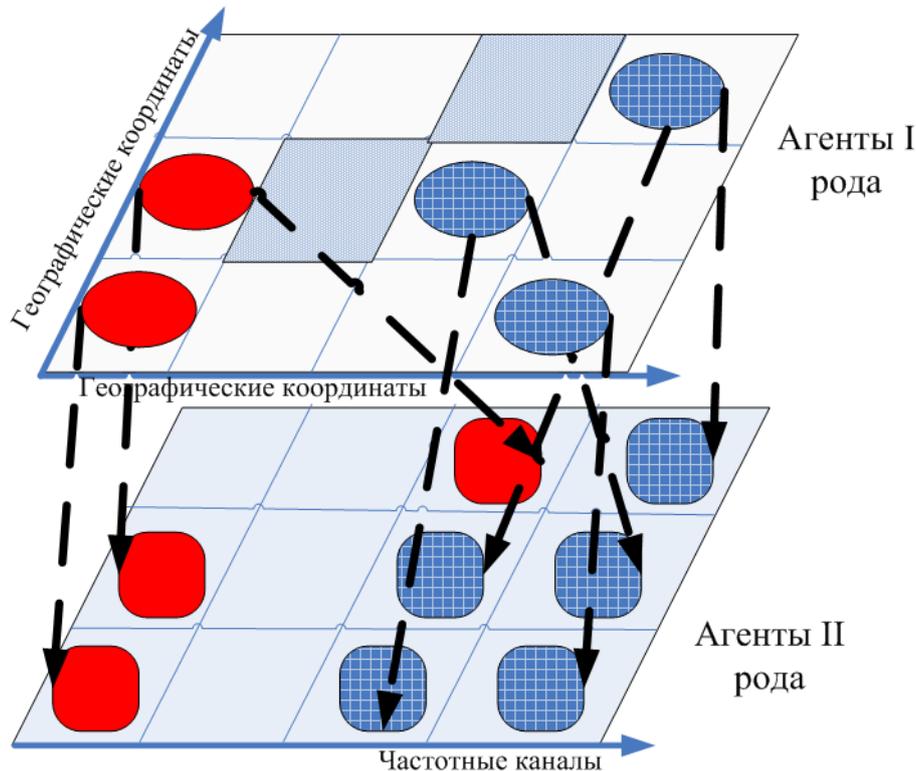


Рис. 3. Агенты I и II рода в модели

себя сведения об известных ему свойствах местности, постоянно обновляя их, и о движении других агентов. Восприятие агентом обстановки может быть искажено под влиянием тех или иных факторов. У каждого агента задано множество целей и есть набор алгоритмов для их достижения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Динамика концентрации агентов на местности с препятствиями

Автор разработал методику проведения экспериментов, позволяющих описывать закономерности движения агентов к заданной цели в зависимости от численных характеристик количества и расположения препятствий типа конфигурационной энтропии, а также выявил ряд таких закономерностей. Например, выявлено [9], что концентрация агентов с может быть описана системой уравнений типа уравнений конвекции-диффузии

$$\frac{\partial c}{\partial t} = C_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + C_2 \frac{\partial C}{\partial x},$$

где C_1, C_2 – некоторые рациональные функции от $x, x^{1/2}, t, t^{1/2}$, и получены зависимости параметров таких уравнений от конфигурационной энтропии ландшафта, по которому перемещаются агенты. Для противоборствующих групп агентов получены некие аналоги законов Осипова – Ланчестера, что показывает, в известной мере, адекватность используемой модели конфликта.

3.2. Статистические свойства квазиоптимальных маршрутов

Исследованы вероятностные характеристики получаемого квазиоптимального маршрута в зависимости от количества и характера расположения препятствий. Так, было определена функции плотности распределения времени прихода в конечную точку маршрута

$$PDF_{\zeta}(z) = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{v^2(t)}{2\sigma^2(t)}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{v^{2k}(t)}{2^k (k!)^2 \sigma^{2k+1}(t)} \times \left(\Gamma\left(k + \frac{1}{2}, \frac{z^2}{2b^2\sigma^2(t)}\right) - \Gamma\left(k + \frac{1}{2}, \frac{z^2}{2\sigma^2(t)}\right) \right)$$

и функция плотности распределения отклонения координат маршрута от оптимального (extreme value distribution)

$$evd(\alpha(t), \beta(t), x) = \frac{1}{\beta(t)} e^{\frac{\alpha(t)-x}{\beta(t)} - e^{\frac{\alpha(t)-x}{\beta(t)}}}.$$

Здесь α , β , ν , σ , b – параметры функции, определяющей характер распределения препятствий.

3.3. Построение строя агентов

Для решения задачи построения строя была разработана метрика несходства графов [10, 17, 18]

$$\text{dist}(\Gamma_1(t), \Gamma_2(t)) = m_0 + m_1 + \sum_{ag \in Ag_c} \left\| \text{coo}_{\Gamma_1}(t, ag) - \text{coo}_{\Gamma_2}(t, ag) \right\|,$$

где $Ag_c \subseteq Ag$ – множество вершин наибольшего общего подграфа Γ_1 (текущего строя) и Γ_2 (желаемого строя), $m_0 = |Ag_0 \setminus Ag_c|$, $m_1 = |Ag_1 \setminus Ag_c|$, $\text{coo}_{\Gamma}(t, ag)$ – координаты агента ag в графе Γ в момент времени t и алгоритм предсказания агентом положения других агентов на следующем ходе на основании предыдущих наблюдений за свойствами местности и движением этих агентов [10].

3.4. Непрерывная задача–предельный случай исследуемого клеточного автомата

Также автор нашел связь между предложенными им клеточными автоматами и непрерывной постановкой оптимизационной задачи многоагентного поиска кратчайшего пути [11]

$$\begin{aligned} \left\| \dot{r}_k(t) \right\| &= u(t, r_k(t)) - v_{k,\varepsilon}(t, r_1(t), \dots, r_m(t); \mathcal{I}), \\ v_{k,\varepsilon}(t, r_1(t), \dots, r_m(t); \mathcal{I}) &= \begin{cases} u(t, r_k(t)), & \xi_k(r_1(t), \dots, r_m(t)) \leq \varepsilon, \\ \chi_\varepsilon(\alpha, \xi_k(r_1(t), \dots, r_m(t))), & \varepsilon + \alpha \geq \xi_k(r_1(t), \dots, r_m(t)) > \varepsilon, \\ 0, & \xi_k(r_1(t), \dots, r_m(t)) > \varepsilon + \alpha, \end{cases} \\ \chi_\varepsilon(\alpha, \xi) &= u(t, r_{k(t)}) \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \text{erf} \left(\frac{z_0(\alpha + 2\varepsilon - 2\xi)}{\alpha} \right) \right), \\ \xi_k(r_1, \dots, r_m) &= \frac{1}{m-1} \sum_{i \in \mathcal{I}^k} \|r_k - r_i\|. \end{aligned}$$

Здесь r_k – маршрут k -го агента, l – его натуральная параметризация, Ω – область, в которой перемещаются агенты, u – функция расположения препятствий, k , ε – параметры. Получены оценки точности приближения оптимального пути клеточным маршрутом. Данная задача затруднялась тем, что применение традиционных вариационных методов для решения невозможно, так как обычно невозможно получить функционал времени прихода в конечную точку в явном виде, а даже если и возможно, то такой функционал оказывается недифференцируемым.

3.5. Модель самоорганизации системы связи

С помощью модели системы связи [19] получены результаты, позволяющие сказать, что самоорганизация агентов II рода в модели каналов связи подобна самоорганизации в модели Шеллинга II и описывается теми же дифференциальными уравнениями (подробнее эти уравнения рассмотрены в работе [20])

$$\frac{dx}{dt} = [xR_x(x) - y]x, \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = [yR_y(y) - x]y. \quad (2)$$

В системе (1)–(2) x и y – это количество агентов, принадлежащих к разным сетям, на одном канале связи, R_x и R_y – функции, зависящие от конкретного алгоритма сегрегации (т. е. самоорганизации сетей на разных частотных каналах без внешних управляющих воздействий).

3.6. Распределение частот в иерархической системе связи

Также, формализована задача автоматизированного распределения частот в сложно организованной системе связи, на примере системы военной связи в тактическом звене управления [7]. Автор решил рассматривать конкретную реализацию распределения частот по устройствам как значение определенной производящей функции вариантов распределения, причем данная функция являлась коитератором, т. е. содержала в себе

информацию о ранее вычисленных вариантах распределения и каждый следующий результат был ближе к желаемому. Параметрами вышеуказанной функции является граф потребностей в связи, ребрами которого являются желаемые связи, а вершинами – типы устройств, а также множество реально существующих в системе устройств вместе с их типами. Таким образом, можно уйти от жесткого задания варианта распределения частот до начала функционирования системы связи. Тогда, например, при существенном изменении помеховой обстановки, агенты смогут самостоятельно вычислить новый вариант распределения частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью предлагаемого в статье программного обеспечения разработана методология выявления зависимости эффективности поведения агентов (скорости движения, качества организации строя, скорости организации сети связи) в зависимости от количества агентов и свойств местности, имеющих каналы связи.

Возможными применениями предлагаемой модели являются вычислительный эксперимент для задач управления строем роботов или беспилотных летательных аппаратов, а также отработка алгоритмов управления такими объектами. Также возможно применить предлагаемый инструментарий при прогнозировании исходов локальных военных операций, например, антитеррористических, и для разработки соответствующих систем поддержки принятия решений. Наконец, предложенное решение годится для моделирования телекоммуникационного трафика в небольших сетях подвижных агентов, движущихся по местности, по которой разбросано большое количество препятствий, затрудняющих связь.

Результаты работы могут быть использованы, например, по аналогии с ОКР «Созвездие», «Созвездие-М» и других, проводимых еще в 2000-х годах, которые были посвящены созданию Единой системы управления Так-

тическим звеном Вооруженных сил РФ [21]. В рамках этих работ была необходима разработка математической модели деятельности тактического воинского формирования. Эти проекты были ориентированы на повышение боевого могущества тактических формирований, которое позволяло компенсировать последствия существенного снижения численности Сухопутных войск ВС РФ. Важнейшей особенностью «сетевидного» управления является его адекватность новым формам и способам ведения мобильных боевых действий в распределенных боевых порядках.

В настоящее время автор работает над моделированием интеллекта агентов на основе древнеиндийских религиозно-философских учений, в которых было принято представлять человеческую личность в виде потока взаимосвязанных психических «атомов», т. е. по сути, в виде модели состояний и переходов. Детальнейшая проработанность этих конструкций связана с тем, что древние индийцы полагали, что чем точнее описана личность, тем скорее возможно избавление от страданий и т. п. сотериологические цели. Автор предполагает крайне перспективным позаимствовать проработанные веками концепции для разработки искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Redi J., Ramanathan R. The DARPA WNaN network architecture // 2011 – MILCOM 2011 Military Communications Conference. – 2011. – P. 2258–2263. – doi 10.1109/MILCOM.2011.6127657. – URL: : https://www.researchgate.net/publication/241634120_The_DARPA_WNaN_network_architecture
2. Кузнецов, А. В. Краткий обзор многоагентных моделей // Управление большими системами: сборник трудов. – 2018. – Вып. 71. – С. 6–44.
3. Кузнецов, А. В. Модель совместного движения агентов с трехуровневой иерархией на основе клеточного автомата // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2017. – Т. 57, № 2. – С. 339–349.
4. Кузнецов, А. В. Упрощенная модель боевых действий на основе клеточного авто-

мата // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2017. – № 3. – С. 59–71.

5. *Kuznetsov, A. V.* Model of the motion of agents with memory based on the cellular automaton // *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. – 2017. – URL: <https://doi.org/10.1080/17445760.2017.1410819>.

6. *Кузнецов, А. В.* Многоагентная модель самоорганизации системы связи // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики : сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (Воронеж, 2017). Воронеж, 2017. – С. 747–749.

7. *Кузнецов, А. В.* Распределение ограниченных ресурсов в системе с устойчивой иерархией (на примере перспективной системы военной связи) // Управление большими системами: сборник трудов. – 2017. – Вып. 66. – С. 68–93.

8. *Кузнецов А. В., Жарков С. Н.* Настройка беспроводной сети специального назначения по защищенному радиоканалу // Электросвязь. – 2016. – № 1. – С. 28–35.

9. *Kuznetsov, Al. V.* Cellular automata-based models of group motion and interaction of agents with memory // Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017) сборник трудов III международной конференции и молодежной школы. Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. – 2017. – С. 1090–1095.

10. *Кузнецов, А. В.* Организация строя агентов с помощью клеточного автомата // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 70. – С.136-167.

11. *Кузнецов, А. В.* О движении агентов по местности с препятствиями // Журнал вычислительной математики и математической физики. – Т. 58, № 1. – С. 143–157.

12. Программная среда многоагентного моделирования «Психолод» 2017619605. Пр. для ЭВМ / Кузнецов А.В., Лещев А.С. 28.08.2017.

13. *Бессонов В. В., Кузнецов А. В.* Описание математической модели системы связи // Теория и техника радиосвязи. – 2010. – № 3. – С. 58–64.

14. Способ организации защищенной системы связи. Патент на изобретение RU 2644523 / Кузнецов А. В., Нестеренко А. В., Богатырев М. В., Пустовит В. П.; заявитель и патентообладатель АО «Концерн «Созвездие», заявл. 02.11.2016, опубл. 12.02.2018.

15. Средство передачи данных телекоммуникационной сети и телекоммуникационная сеть. Патент на изобретение RU 2549120 / Обельченко М. В., Мохряков В. Б., Бессонов В. В., Кузнецов А. В. ; заявитель и патентообладатель АО «Концерн «Созвездие». – 2012155881, опубл. 20.04.2015.

16. Квазиоптимальное распределение авионики на основе клеточного автомата и муравьиного алгоритма / А. В. Кузнецов, Н. И. Сельвесюк, М. Е. Семенов, Г. А. Платошин // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 38-45.

17. *Кузнецов, А. В.* Мера несходства на множестве графов и ее приложения // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2017 – № 1. – С. 125–131.

18. *Schumann A., Kuznetsov A. V.* Foundations of mathematics under neuroscience conditions of lateral inhibition and lateral activation // *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. – 2018. – V. 33, No. 3. – P. 237–256. DOI: 10.1080/17445760.2018.1439490.

19. *Кузнецов, А. В.* Модель системы связи мобильных агентов, соединенная с моделью движения, и ее реализация в среде «Психолод» // XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2018). Воронеж: ООО «ВЭЛБОРН». – 2018. – Т. 5. – С. 351–360.

20. *Haw D. J., Hogan J.* A dynamical systems model of unorganized segregation // *The Journal of Mathematical Sociology*, 2018. – V. 0, no. 0. – P. 1–15. –<https://doi.org/10.1080/0022250X.2018.1427091>

21. Комплекс ЕСУТЗ: желаемое и действительное. URL: <http://army-news.ru/2010/11/kompleks-esu-tz/>

А. В. Кузнецов

Кузнецов Александр Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент факультета прикладной математики, информатики и механики Воронежского государственного университета.
E-mail: avkuz@bk.ru

Kuznetsov Alexander Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences. Associate Professor, Faculty of Applied Mathematics, Informatics and Mechanics, Voronezh State University.
E-mail: avkuz@bk.ru