

На правах рукописи



Кузнецов Александр Владимирович

**Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных
агентов в иерархических системах на основе клеточных
автоматов**

Специальность 05.13.01 —
«Системный анализ, управление и обработка информации
(радиотехника, автоматика, связь)»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Воронеж — 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Леденева Татьяна Михайловна

Официальные оппоненты: **Вирченко Юрий Петрович**,
доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», кафедра теоретической и математической физики, профессор

Осипов Василий Юрьевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБУН «Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук», лаборатория информационно-вычислительных систем и технологий программирования, руководитель лаборатории

Скореходов Владимир Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», кафедра алгебры и дискретной математики, профессор

Ведущая организация: ФГБУН «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук»

Защита состоится 12 сентября 2019 г. в 15:20 часов на заседании диссертационного совета Д 212.038.10 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» и на сайте <http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3206>.

Автореферат разослан _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Степкин Владислав Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Технология многоагентных систем – это активно развивающееся научное направление, которое в настоящее время находится в стадии становления, но уже активно используется для решения сложных прикладных задач, допускающих декомпозицию на отдельные задачи, которые назначаются агентам. Последующая композиция найденных агентами частных решений позволяет определить решение глобальной задачи.

В настоящем исследовании под термином *агент* понимается реальная или виртуальная автономная сущность, функционирующая во внешней динамической среде, способная воспринимать состояние этой среды и взаимодействовать с другими агентами с помощью некоторого языка коммуникаций, проявляя независимое поведение, обусловленное знаниями и ментальными свойствами.

В широком смысле *многоагентная система* представляет собой модель, которая имитирует одновременные действия и взаимодействия нескольких *агентов* в попытке воссоздать течение некоторого процесса или состояние моделируемой сложной системы.

Можно выделить несколько направлений активных исследований в области теоретических основ многоагентных систем: формализация и моделирование основных понятия и компонентов, в частности, понятия агента и его ментальных свойств; организационное моделирование многоагентных систем на основе общей теории систем и организаций; разработка процедур обучения и самообучения агентов и многоагентной системы в целом; поддержка сетевого взаимодействия на основе обеспечения мобильности агентов и их согласованного поведения в различных средах; развитие агентно-ориентированного программирования, а также технологий параллельных и распределенных вычислений именно для многоагентных систем. Теоретическую базу для разработки многоагентных систем составляют подходы, основанные на сетях Петри; событийных моделях и имитационном моделировании; игровых, марковских моделях; J-сетях; клеточных автоматах.

В последнее время многоагентные системы широко используются для решения разнообразных задач: коллективное управление, управление различными процессами (логистика, дорожное движение) и динамическими объектами со сложным поведением (например, управление орбитальной группировкой космических аппаратов); задач моделирования организованного и хаотического движения (перемещение военного строя, движение людей при катастрофах и панике, перемещение клеток в кровеносных сосудах и т.п.), социально-экономических отношений, рискованных ситуаций, динамики онлайн-дискуссий в сети интернет и др.; задач принятия решений в условиях неопределенности; задач, связанных с обработкой информации (организация сетевых вычислений, обеспечение устойчивости функционирования распределенных информационных систем, оптимизация параллельной обработки информации).

Продвижение технологии многоагентных систем в область практических приложений – это актуальная научно-техническая проблема, решение которой позволит повысить степень обоснованности принимаемых решений в социальных, экономических и технических системах; качество и адекватность моделей различных процессов перемещения дискретных объектов; эффективность функционирования технических и иных сложных систем, в частности, мобильных роботов, беспилотных летательных аппаратов и других интеллектуальных устройств при их групповой эксплуатации.

Одним из приложений технологии многоагентных систем является когнитивное радио – перспективное направление разработки радиосистем. Согласно отчету Сектора радиокommunikаций Международного союза электросвязи SM.2152 Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS), *когнитивное радио* – это система радиосвязи, способная получать сведения об особенностях собственной эксплуатации и на основе этих знаний корректировать параметры своей работы. Различные проблемы, связанные с адаптацией радиосети к изменяющимся помеховым условиям, связаны с самоорганизацией радиостанций на основе *когнитивной радиосети* (cognitive network), в которой все узлы обладают как «осознанием» изменений частотного спектра (spectrum sensing), что обусловлено свойствами когнитивного радио, так и общей «плоскостью знаний» (knowledge plane) сети, которая содержит сведения о типе, предназначении и состоянии узлов сети. В такой сети узлы согласованно занимают или освобождают те или иные частотные каналы в зависимости от своего положения в иерархии узлов, изменений помеховой обстановки или других обстоятельств на основе динамического управления спектром. Данная технология активно используется в разрабатываемых сейчас за рубежом перспективных системах военной связи (см., например, работы J. Redi и R. Ramanathan).

Диссертационная работа посвящена разработке теоретических основ многоагентного моделирования иерархических систем на основе клеточных автоматов.

Работа выполнена в рамках одного из основных научных направлений Воронежского государственного университета «Математическое моделирование, программное и информационное обеспечение, методы вычислительной и прикладной математики и их применение к фундаментальным исследованиям в естественных науках».

Степень разработанности темы исследования.

Многоагентному моделированию посвящено множество работ отечественных и зарубежных ученых: G. Antonelli, K. Batool, F. Bullo, M.A. Niazi, B. Beer, C.W. Reynolds, C. Tsatsoulis, L.-K. Soh, P. Stone, M. Veloso, A. Rousset, B. Herrmann, C. Lang, L. Philippe, A.S. Rao, M.P. Georgeff, R. Tempo, K.-K. Oh, M.-C. Park, H.-S. Ahn, L. Merghem, H. Lecarpentier, H. Ma, T. K. S. Kumar, S. Koenig, T. Leppänen, M. Liu, E. Harjula, A. Ramalingam, J. Ylioja, P. Narhi, J. Riekkö, T. Ojala, K. Kravari, N. Bassiliades, A. Kesting, M. Treiber, D. Helbing, Z.

Kan, L. Navaravong, J. M. Shea, E. L. Pasiliao, W. E. Dixon, J. Jones, R. Mayne, C. A. Iglesias, M. Garijo, J. C. González, J. P. Müller, M. P. Singh, L. Hamill, N. Gilbert, T. J. Gordon, E. Frias-Martinez, G. Williamson, V. Frias-Martinez, J. Ferber, A. J. Ellery, R. E. Baker, S. W. McCue, M. J. Simpson, R. Dutta, L. Sun, M. Kothari, R. Sharma, D. J. Pack, R. H. Bordini, L. Braubach, M. Dastani, A. Pokahr, A. Ricci, M. A. Niazi, O. Amir, G. Sharon, R. Stern, S. M. A. Abbas, В.И. Городецкий, В.Б. Евгеньев, Д.А. Новиков, И.А. Каляев, С.Э. Парсегов, А.В. Проскурников, А.С. Матвеев, И.Д. Зайцев, О.В. Карсаев, Д. Будаев, К. Амелин, Г. Восчук, П. Скобелев, Н. Амелина, А. Борщев, А. Филиппов и других.

Выбор теории клеточных автоматов для развития теории многоагентных систем в диссертации обусловлен их широким использованием, что подтверждается работами Г. Г. Малинецкого, М. Е. Степанцова (модели движения групп людей), I. G. Papadopoulos, G. Ch. Sirakoulis (модели социальных систем), R. Mead, J.B. Weinberg, (передвигающиеся строим роботы), A. Adamatzky, A. Schumann (биологические и химические компьютеры), L. Johnson, G. N. Yannakakis, J. Togelius (процедурная генерация поверхностей), A. Pachinski, G. C. McIntosh, D. P. Galligan (модели боевых действий) и других.

Объектом исследования являются иерархические системы мобильных агентов в динамической среде.

Предметом исследования являются закономерности функционирования иерархических систем мобильных агентов в динамической среде, а также модели, методы и алгоритмы управления и принятия решений агентами в динамической среде.

Цель диссертационной работы заключается в развитии теории и технологий моделирования иерархических систем коммуницирующих мобильных агентов, перемещающихся в динамической среде с препятствиями, для повышения качества моделей поведения агентов и эффективности управления такими системами.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

1. Анализ существующих подходов к многоагентному моделированию сложных систем на основе клеточных автоматов.
2. Синтез моделей ландшафта с динамическими характеристиками.
3. Разработка дискретной модели группового движения и взаимодействия систем интеллектуальных мобильных агентов с памятью на основе клеточных автоматов.
4. Разработка и исследование непрерывной модели группового движения агентов.
5. Разработка децентрализованной модели системы связи, включая модель канала связи агентов.
6. Разработка структуры программного комплекса, а также математического, алгоритмического и программного обеспечения для реализации

многоагентной системы иерархически организованных, коммуницирующих мобильных агентов, перемещающихся в динамической среде с препятствиями.

7. Проведение вычислительного эксперимента для апробации предложенных моделей, анализ результатов и разработка рекомендаций по использованию многоагентной системы для практических приложений (когнитивное радио).

Научная новизна.

В диссертации получены следующие результаты, характеризующиеся научной новизной:

1. Для формализованного описания среды впервые понятие ландшафта и его компонентов введено как множество классов клеток клеточного автомата с определенным набором свойств. Предложены методы генерации случайных ландшафтов с заданными характеристиками. При этом каждой клетке ландшафта ставится в соответствие максимально возможная скорость пересечения клетки, что позволяет оценить эффективность алгоритмов движения агента в заданной среде.
2. Предложена модель движения мобильных агентов в форме клеточного автомата, отличающаяся формализованным описанием среды с помощью понятия ландшафта и позволяющая на единой основе разрабатывать алгоритмы поведения агентов (в том числе организованное) в динамической среде с препятствиями.
3. Разработан оригинальный метод формализованного описания группового движения и конфликта системы агентов, соединенной с моделью системы связи, отличающийся от других подобных многоагентных моделей тем, что в ней как движение агентов, так и организация системы связи моделируется двумя сопряженными клеточными автоматами и тем, что местность содержит препятствия и может меняться в процессе движения.
4. Получены ранее не исследованные зависимости характеристик движения агентов и ландшафтных метрик. Предложена методика проведения экспериментов, позволяющих описывать закономерности движения агентов к заданной цели, отличающаяся использованием числовых характеристик количества и расположения препятствий типа конфигурационной энтропии.
5. Предложена оригинальная непрерывная нелинейная модель движения агента по пересеченной местности (в виде задачи оптимального управления с нелинейными дифференциальными ограничениями). Указанная модель отличается от известных тем, что не требует гладкости траекторий агента и функции, описывающей распределение препятствий по *ландшафту*. Данная модель позволяет исследовать

агента, движущегося по параметрически заданным траекториям с «изломами». Показано, что непрерывная нелинейная модель движения агента является предельным случаем дискретной модели.

6. Предложен метод самоорганизации системы мобильных агентов, располагающих набором каналов связи, на основе обмена маячками и поочередного сканирования каналов в несколько сетей связи. Показано, что самоорганизация описывается моделью сегрегации Шеллинга типа II. Указанный алгоритм исследован с помощью вычислительного эксперимента, определены условия его сходимости.
7. Разработана структура программного комплекса «Психодод», его алгоритмическое обеспечение и программная реализация, основными функциональными возможностями которого являются следующие: моделирование агентов, их движения, взаимодействия; моделирование и анализ многоагентной системы; визуализация функционирования многоагентной системы. В отличие от аналогов типа NetLogo разработанный программный комплекс «Психодод» отличается быстродействием за счет оптимизации параметров и адаптации системы путем настройки на конкретные задачи исследования.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость заключается в развитии теории и разработке новых технологий моделирования для многих задач, связанных с движением и коммуникацией агентов. Поскольку в приложениях, как правило, известны лишь дискретные наборы данных, характеризующих движение агента, и управление агентом происходит тоже в дискретном времени, то использование дискретных моделей, на взгляд автора, более оправдано (например, в плане вычислительной сложности), чем реконструкция непрерывной модели движения по дискретным данным с последующей дискретизацией полученного решения. Описание системы агентов в виде ограниченного набора правил и графов позволяет моделировать движение и связь системы из значительного количества агентов без особых вычислительных трудностей.

Результаты диссертации ориентированы на непосредственное практическое применение. Они могут использоваться

- для системного подхода в анализе проведения и планирования локальных военных операций, например, антитеррористических, и для разработки соответствующих систем поддержки принятия решений;
- при разработке систем когнитивного радио, что подтверждается патентами на изобретение, которые были использованы в производстве АО «Концерн «Созвездие», № 2644523, №2549120 и актом об использовании изобретения от 23 сентября 2015 г.;
- для проектирования систем интегрированной модульной авионики;
- для проведения вычислительного эксперимента для задач управления строем роботов или беспилотных летательных аппаратов и отработки алгоритмов управления такими объектами;

- для моделирования телекоммуникационного трафика в небольших сетях подвижных агентов, движущихся по местности, на которой имеется большое количество препятствий, затрудняющих связь (свидетельства о регистрации программы для ЭВМ № 2016615934, № 2017616905).

Предложенные модели взаимодействия агентов можно использовать для разработки систем искусственного интеллекта и приложений, которые с ним связаны. Результаты диссертации используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» при чтении спецкурсов («Технологии искусственной жизни», «Основы агентных систем») и выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ.

Методология и методы исследования. В диссертации для моделирования движения, взаимодействия и связи агентов применялась методология системного анализа и теории систем, в частности, модели клеточных автоматов и многоагентные модели. Для решения отдельных задач построения строя агентов применялся аппарат теории графов и топологии, методы функционального анализа и теории дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, методы математической статистики. При разработке программного комплекса использовались технологии объектно-ориентированного и акторного программирования.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Совокупность методов построения и тестирования алгоритмов группового движения агентов с использованием наборов случайных ландшафтов с фиксированными характеристиками (соответствует п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем»).
2. Метод формального описания группового движения и конфликта агентов по пересеченной местности, по которой случайным образом разбросаны препятствия разной проходимости, основанный на клеточном автомате (соответствует п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»).
3. Теорема о том, что кратчайший по времени путь агента в виде ломаной, полученный с помощью клеточного автомата, является приближенным решением непрерывной оптимизационной задачи поиска кратчайшего по времени пути в области, в каждой точке которой задано ограничение на максимальный модуль скорости агента (соответствует п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»).

4. Оценка точности приближения пути агента, зависящая от ширины клетки (соответствует п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»).
5. Клеточный автомат, моделирующий сеть связи движущихся по местности с препятствиями иерархически организованных агентов (соответствует п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»).
6. Алгоритм автоматической организации сетей связи (соответствует п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»).
7. Программная среда «Психодод», в которой были произведены все исследования диссертации (соответствует п. 5 «Разработка специального математического и программного обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 12 «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации»).

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов и выводов подтверждается корректным применением математического аппарата; сопоставлением результатов теоретических исследований и экспериментальных данных с опубликованными результатами других исследователей; положительными результатами проведенных экспериментов и опытом практической эксплуатации разработанной сети связи, что подтверждается актами о внедрении. Код программного обеспечения, которое использовалось для получения экспериментальных данных, размещен в общедоступном репозитории <https://bitbucket.org/bokohodteam/bokohod>.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались в 2015–2018 гг. на международных конференциях «Радиолокация, Навигация, Связь» (RLNC-2016, RLNC-2018, г. Воронеж), «Математические методы в технике и технологиях» (ММТТ-30, г. С.-Петербург), «Воронежская Зимняя Математическая Школа» (ВЗМШ-2016, г. Воронеж), «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (АППМИМ-2015, АППМИМ-2017, г. Воронеж), «Информационные технологии и нанотехнологии» (ITNT-2017, ITNT-2018, г. Самара), «Современные сложные системы управления» (СССУ-2017, г. Липецк), VICT 2017 – 10th EAI International Conference on Bio-Inspired Information and Communications Technologies (организатор – European Alliance for Innovation, г. Хобокен, Нью-Джерси, США), 27th International Conference in Operator Theory (2018 г., Западный университет

Тимишоара, г. Тимишоара, Румыния), «Социофизика и социоинженерия'2018» (ИПУ РАН, г. Москва). Результаты диссертации обсуждались на семинаре «Теория управления организационными системами», проводимом в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (2017–2018 гг.), а также на ежегодных научных сессиях Воронежского государственного университета (2016–2019 гг.).

Личный вклад. В диссертации представлены теоретические результаты, выполненные лично автором или под его непосредственным руководством. Экспериментальные данные получены с помощью программного комплекса, разработанного автором, или при его участии. В научных работах, выполненных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: [5] – теоретические результаты, касающиеся метрики несходства графов и ее приложениям; [3;14;15;24;33;34;36] – постановка задач исследования, теоретическое обоснование метода решения задачи (при участии соавторов, при этом результаты соавторов не относятся к положениям, выносимым на защиту), разработка программного обеспечения; анализ результатов эксперимента и формулировка выводов; [18] – разработка метода решения задачи, экспериментальное исследование и формулировка выводов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 19 статьях в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, которые либо индексируются в базах данных Web of Science: Core Collection [1–6], базах данных Scopus [7], базах данных MathSciNet: [8;9], либо в иных журналах, которые входят в перечень рецензируемых научных изданий ВАК Минобрнауки России: [10–19], а также в 13 докладах на международных конференциях [20–23] (индексируются Scopus) и [24–32]. Получено два патента на изделия, реализующие алгоритмы [33; 34], два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [35; 36].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Полный объём диссертации составляет 268 страниц, включая 65 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 157 наименований.

Основное содержание работы

Во введении сформулирована актуальность работы, определены цели и задачи, обоснована научная новизна, практическая и теоретическая значимость, представлены основные положения и результаты, выносимые на защиту. Логика диссертационного исследования базируется на структуре многоагентной системы, приведенной на рис. 1 и предполагает разработку моделей и алгоритмов движения и взаимодействия системы агентов. По сути, многоагентная система представляет инструментарий, позволяющий моделировать поведение сложно организованных групп агентов на местности с заданным количеством случайных препятствий разных типов.

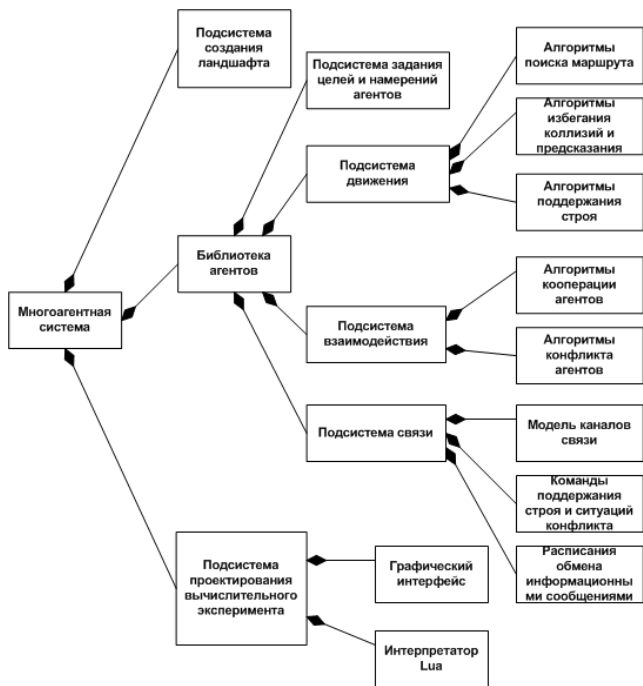


Рис. 1 — Структура многоагентной системы и комплекса моделей и алгоритмов, необходимых для реализации подсистем

В предлагаемой модели присутствуют несколько видов агентов и несколько типов взаимодействия. Агенты (рис. 2) 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 рис. 2 показаны группы противоборствующих агентов I рода. Видно, что один агент I рода может «обладать» несколькими агентами II рода. Множество всех агентов I рода далее обозначается как Ag .

Взаимодействие агентов I рода включает следующие типы:

- 1) агенты могут, намеренно или нет, заблокировать 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: построение сети связи в соответствии с заданным образцом и самоорганизация сети связи по типу сегрегации (модель Шеллинга типа II).

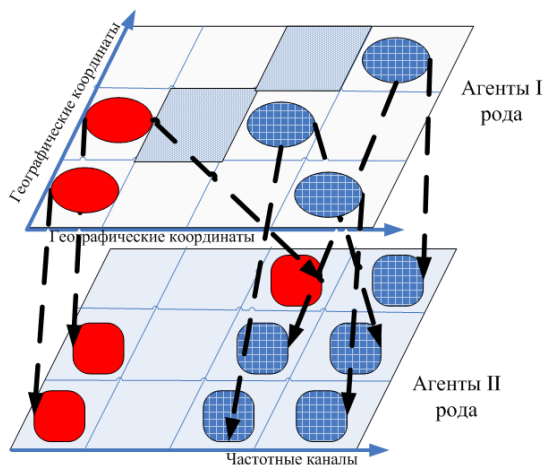


Рис. 2 — Слои взаимодействия агентов

Агенты обладают внутренней памятью и являются рефлексивными, т.е. каждый агент хранит 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.

В диссертации использовались следующие основные показатели качества алгоритма поведения агента:

- 1) разность Δt времени, затрачиваемое для расчета оптимальной стратегии агента, и времени, затрачиваемого при расчете агентом стратегии своего поведения по некоторому приближенному алгоритму;
- 2) отклонение выбираемой агентом траектории от заранее известной оптимальной Δr ;
- 3) отклонение времени достижения агентом цели от заранее известного оптимального ΔT .

Общая схема проведения экспериментов состояла в том, что генерируется большое количество тестовых ландшафтов с заданными характеристиками, для каждого из них рассчитываются значения показателей Δt , Δr , ΔT . Затем вычисляются средние значения Δt , Δr , ΔT , на основе которых делается вывод о пригодности того или иного алгоритма для использования на ландшафте с заданными характеристиками. Далее, параметры алгоритма изменялись так, чтоб одновременно минимизировать Δr , ΔT и максимизировать Δt .

В **первой главе** приведен обзор существующих работ по многоагентным системам. Рассматриваются работы общего характера, описывающие основные направления многоагентного моделирования. Приводятся разные определения агентов, из которых далее используется следующее:

Определение 1. Мобильный агент ag , двигающийся по разбитой на клетки области Ω_n , в момент дискретного времени $t \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$ представляет собой объект

вида

$$ag = \{selfId, leadId, lead, w, \mathcal{D}', trgtAct, trgtTmpl, formTmpl, @cell, pr+\},$$

где $selfId$ – уникальный идентификатор агента, $leadId \in \mathbb{N}$ – уникальный идентификатор лидера данного агента; $lead \in \{true, false\}$ – указывает на то, что агент является ведущим; w – количество тактов, которое агент уже простоял в текущей клетке; \mathcal{D}' – упорядоченный по убыванию желательности список возможных направлений из \mathcal{D} для агента на следующий такт; $trgtAct \in \Omega_h$ – текущая целевая клетка агента; $trgtTmpl \in \Omega_h$ – временная целевая клетка агента; $formTmpl = \Phi_h(ag)$ – шаблон строя; $@cell$ – указатель на ячейку, в которой находится агент ag в момент времени t . Ячейка $cell$, соответствующая клетке $(i, j) \in \Omega_h$ представляет собой $cell = \{u, coo, @ag\}$, где u – значение функции непроницаемости клетки (т.е. минимальное количество тактов, нужное для преодоления клетки); $coo = (i, j)$; $@ag$ – указатель на агента, находящегося в клетке (i, j) в момент времени t или нуль, если в (i, j) в момент времени t нет агента; $pr+$ – прочие свойства агентов, включая его внутреннюю память, сведения о свойствах местности и других агентах.

Также приводятся применения многоагентных систем и близких к ним абстракций, в особенности функционирующих в дискретном пространстве и времени. Описаны применяющиеся в прикладной математике и механике основанные на клеточных автоматах модели жидкости и газа (S. Wolfram и др.). Приведены модели роста злокачественных опухолей и подобные модели из биологии и медицины (T. Alagón и др.). Описаны неклассические вычисления, т.е. в вычисления на основе биологических, химических и т.п. компьютерах с помощью гигантских одноклеточных организмов – слизевиков (A. Schumann, A. Adamatzky).

Кратко охарактеризованы клеточно-автоматные модели автомобильного движения, многоагентные модели систем связи. Особо затрагиваются социально-экономические приложения многоагентных систем: модели движения толпы (Д.А. Новиков) и боевых действий (A. Pachinski). Модели боевых действий представляют особый интерес, так как с их помощью в США разрабатываются средства управления войсками и оружием.

Также описаны модели движения строя роботов и толп людей, оказавшие наибольшее влияние на диссертацию и являвшиеся ее отправной точкой. С математической точки зрения, такая 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 параметры ячейки

включают текущие координаты агента, свойства местности, в которой находится агент.

Во второй главе строится формализованное описание предлагаемой автором многоагентной системы на языке клеточных автоматов в части подсистем создания ландшафтов, движения, задания целей и намерений, взаимодействия агентов.

Определение 2. Клеточным автоматом называется набор $(\mathbb{Z}^k, \mathcal{W}, V)$, где \mathcal{W} – конечный автомат с n основными и p боковыми входными каналами, m основными и p боковыми выходными каналами, l состояниями, помещенный в каждый узел целочисленной решетки \mathbb{Z}^k и задаваемый системой уравнений:

$$\begin{cases} y(t) = \varphi_1(x(t), b(t), \mathbf{s}(t)), \\ a(t) = \varphi_2(\mathbf{s}(t)), \\ \mathbf{s}(t+1) = \varphi(x(t), b(t), \mathbf{s}(t)), \end{cases}$$

$$\varphi_1 : \mathcal{E}^n \times \mathcal{E}^p \times \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{E}^m, \quad \varphi_2 : \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{E}^p, \quad \varphi : \mathcal{E}^n \times \mathcal{E}^p \times \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{E}^m,$$

где $x = (x_1, \dots, x_n)$, $b = (b_1, \dots, b_p)$, $a = (a_1, \dots, a_p)$, $y = (y_1, \dots, y_m)$ обозначают соответственно основной вход, боковой вход, боковой выход и основной выход; \mathbf{s} – состояние автомата, $t = \overline{0, N}$ – такт дискретного времени, \mathcal{E} – входной и выходной алфавит; \mathcal{S} – множество состояний автомата \mathcal{W} , $V = (\alpha_1, \dots, \alpha_p)$; $\alpha_i \in \mathbb{Z}^k$, $i = \overline{1, p}$, – шаблон соседства: для автомата в узле α каждый $\alpha_i \in V$ определяет конечный автомат с координатами $\alpha + \alpha_i$, с i -м боковым выходным каналом которого соединен i -й боковой входной канал автомата в узле α .

Агентной функции соответствует локальная функция перехода клеточного автомата, восприятию – боковой и основной входы, а действию агента – боковой и основной выходы клеточного автомата.

Для формального определения среды, в которой взаимодействуют агенты, вводится понятие ландшафта, рассматриваются способы генерации тестовых ландшафтов, исследуются различные характеристики ландшафтов и их зависимости. Определяется модель движения агента по пересеченной местности и описываются клеточные автоматы, моделирующие этот процесс, а также децентрализованное построение и поддержание строя агентов во время движения. Исследуются характеристики автоматов.

Определение 3. Назовем ландшафтом (рис. 3) в момент времени t множество классов клеток определенного подмножества замощения $\mathcal{L}(\Omega_h, l) = \{u_{ij} | u_{ij} = u(t, \omega_{ij}), \omega_{ij} \in \Omega_h\}$, такого что u принимает на $\{\omega_{ij} | i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$ не более l значений, причем к классу i принадлежит N_i клеток, то есть $\sum_{i=1}^l N_i = M$, $M = |\mathcal{L}(\Omega_h, l)|$.

Определение 4. Конфигурационной энтропией ландшафта $\mathcal{L}(\Omega_h, l)$ называется величина

$$\mathcal{L}(\Omega_h, l) = - \sum_{i=1}^l \frac{N_i}{M} \ln \frac{N_i}{M}.$$

Определение 5. Общий край (Total Edge, TE) определяется как общее количество соприкосновений сторон клеток в $\mathcal{L}(\Omega_h, l)$, принадлежащих к разным классам. Будем далее обозначать Total Edge ландшафта $\mathcal{L}(\Omega_h, l)$ как $TE(\mathcal{L}(\Omega_h, l))$.

Определение 6. Плотностью общего края (TED) для ландшафта $\mathcal{L}_{n \times m}(l)$ называется величина

$$TED(\mathcal{L}(\Omega_h, l)) = TE(\mathcal{L}(\Omega_h, l))/M.$$

Для ландшафтов, генерируемых для тестирования алгоритмов обхода препятствий и поиска кратчайшего пути, клетки ландшафта будут делиться на классы по максимально возможной скорости пересечения клетки. Все предлагаемые алгоритмы генерации ландшафта основаны на получении случайного вектора количества классов клеток $V = (V_1, \dots, V_l)$, соответствующего заданным значениям конфигурационной энтропии. Затем происходит размещение V_l клеток l -го класса в случайных или предопределенных местах ландшафта в соответствии с заданным значением общего края TE. Для случайного размещения клеток используются алгоритмы в которых сначала в произвольных местах размещаются клетки самого немногочисленного класса, вокруг них – более многочисленного и т.д.

Вид ландшафтов 48×48 клеток, генерируемых по вышеуказанному алгоритму, приведен на рис. 3, где обозначено $S = S(\mathcal{L}(48 \times 48, 9))$, $TED = TED(\mathcal{L}(48 \times 48, 9))$.

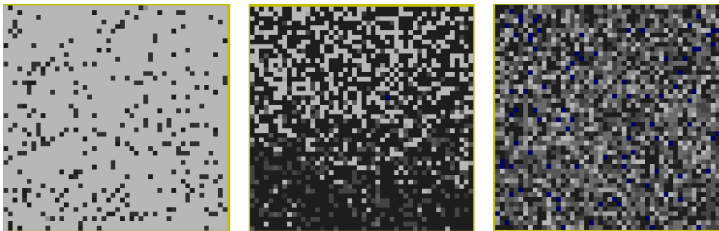


Рис. 3 — Примеры ландшафтов $\mathcal{L}(48 \times 48, 10)$. Слева направо $S = 0.349119$, $TED = 0.40842$, $S = 1.1004$, $TED = 1.05773$, $S = 2.00013$, $TED = 1.63411$

В ходе проведенных вычислительных экспериментов выяснилось, что практически среднее значение TED не зависит от количества клеток в ландшафте, а зависит лишь от количества классов клеток. Из эмпирических

соображений (рис. 4) получена зависимость среднего значения $TED(\mathcal{L}(n \times m, l))$ от l и конфигурационной энтропии S в форме

$$\overline{TED} = a_1(l)\sigma(Sb_1(l)/\ln l) + a_1(l)/2,$$

где $\sigma(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$, a_1 , b_1 – неизвестные функции, необходимая для генерации ландшафта с заданными характеристиками. Подбирая параметры по

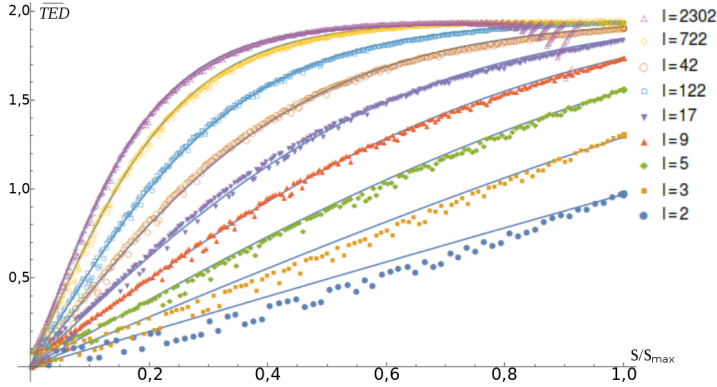


Рис. 4 – Зависимость \overline{TED} от S/S_{max} и количества классов клеток l ($n = m = 48$)

экспериментальным данным, можно получить (с коэффициентами детерминации $r^2 = 0.999999$ для a_1 и $r^2 = 1.0$ для b_1) следующие аппроксимации:

$$a_1(l) = 3.90302 + 5.25218(x - 10.9641)^{-2.19235},$$

$$b_1(l) = 1.15228 \ln(0.990096x - 1.18397).$$

Исследование подсистемы движения агентов.

В диссертации предложена методика проведения экспериментов, позволяющих описывать закономерности движения агентов к заданной цели в зависимости от числовых характеристик количества и расположения препятствий типа конфигурационной энтропии. Данная методика позволила выявить ряд важных закономерностей.

Для характеристики группового поведения агентов вводится показатель $c(t, x)$ – среднее число агентов в зависимости от времени t и положения x на ландшафте. Генерируется 150 случайных ландшафтов с заданной энтропией по соответствующему алгоритму. Группа, образованная из $u_0 = 48$ агентов, перемещается с одной стороны квадратного ландшафта в противоположную. Вычисляется зависимость среднего (по всем генерируемым ландшафтам) числа агентов c на x -й строке ландшафта от дискретного времени t , $x = \overline{1}, x_{max}$, $x_{max} = 48$ и выясняется, что эта зависимость определяется, главным образом,

не видом конкретного ландшафта, а конфигурационной энтропией ландшафта S . Установлено, что величина c (аналог концентрации для агентов) может быть описана уравнением 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 $x, x^{1/2}, t, t^{1/2}$. В рамках проведенного исследования получены зависимости параметров таких уравнений от конфигурационной энтропии ландшафта, по которому перемещаются агенты.

Начальные условия задаются в виде

$$c(x,0) = c_0 \delta(x - 1), \quad \delta(x) = \begin{cases} 1, & x = 0, \\ 0, & x \neq 0, \end{cases}$$

а асимптотическое условие имеет вид

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(x,t) = c_0 \theta(x - x_{\max}), \quad \theta(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Вышеприведенную задачу можно решить стандартными методами решения уравнения в частных производных для уравнений диффузии. Вид

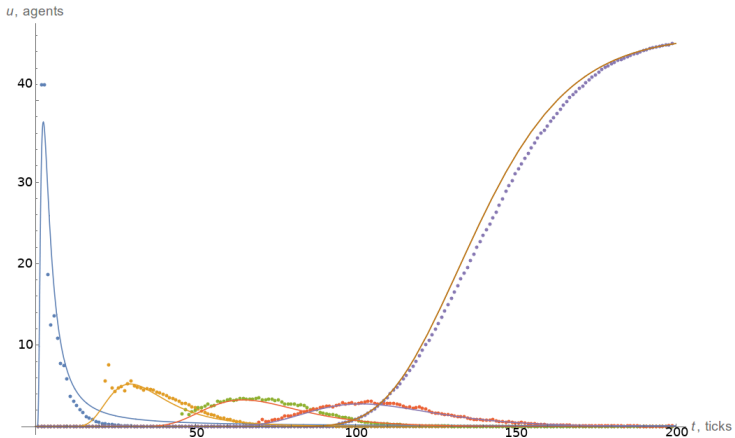


Рис. 5 – Зависимость среднего количества агентов c от дискретного времени t , $N_{obst} = 20$, $x = 2, x = 12, x = 24, x = 36, x = 48$ слева направо

исследуемой зависимости среднего количества агентов c от дискретного времени t показан на рис. 5. Точками обозначены экспериментальные данные, сплошными кривыми – решение уравнения.

Статистические свойства квазиоптимальных маршрутов.

Движение агента по случайному ландшафту рассматривается как реализация броуновского моста (случайного блуждания с фиксированным концом). В работе К. Vuchin, S. Sijben и др. рассматривалась модель движения броуновского моста, которая обеспечивает биологически обоснованное приближение пути движения животного в поисках корма на основе дискретных данных местоположения и является методом количественной оценки распределения использования (utilization distribution). В диссертации исследуются статистические свойства квазиоптимальных траекторий агента, получаемых с помощью клеточного автомата.

Исследованы вероятностные характеристики получаемого квазиоптимального маршрута в зависимости от количества и характера расположения препятствий. Доказаны следующие утверждения

Утверждение 1. *Функция плотности распределения времени прихода в конечную точку маршрута имеет вид*

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

Утверждение 2. *Функция плотности распределения отклонения координат маршрута от оптимального (extreme value distribution) имеет вид*

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

Здесь $\alpha, \beta, \nu, \sigma, b$ – параметры функций плотности, определяющей характер распределения препятствий, Γ – неполная гамма-функция. Функции $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ при $t > 20$, например, для ландшафта с равномерно рассеянными препятствиями ($\mathcal{L}(100 \times 100, 9)$, $S = 2.125$) приближаются линейными функциями

$$\alpha(t) + \gamma\beta(t) = \mathbb{E}x(t) = 0.979616 + 0.199427t,$$

где γ – постоянная Эйлера, $\alpha(t) = 0.352148 + 0.170925t$.

Построение строя агентов.

Пусть Ag – множество агентов, $Ag_1, Ag_2 \subseteq Ag$ – множества вершин графов Γ_1, Γ_2 .

Определение 7. *Метрикой несходства графов Γ_1, Γ_2 назовем отображение*

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

где Ag_c – множество вершин наибольшего общего подграфа Γ_1 (текущего строя) и Γ_2 (желаемого строя), $m_0 = |Ag_0 \setminus Ag_c|$, $m_1 = |Ag_1 \setminus Ag_c|$.

Пусть заданы

- 1) функция проходимости $u^c : [0, T] \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$, $u^c(t, r)$ – это максимально возможная норма скорости в момент времени $t \in [0, T]$ в точке $r \in \Omega$;
- 2) желаемый граф строя $\Phi = (Ag, E, \text{соо}_{\Phi}^c)$, $E \subseteq Ag^2$ – множество ребер, $\text{соо}_{\Phi}^c : [0, T] \times Ag \rightarrow \Omega$ – функция, дающая желаемые для сохранения строя координаты агента в Ω ;
- 3) фактический граф строя $\Gamma = (Ag, E, \text{соо}_{\Gamma}^c)$, $\text{соо}_{\Gamma}^c : [0, T] \times Ag \rightarrow \Omega$ – функция, определяющая реальные координаты агента в Ω .

Необходимо найти такие траектории агентов, чтоб время $T = \max_{k=\overline{1, n}} T_k$ было минимальным, т.е. надо минимизировать все функционалы T_k , сопоставляющие траектории r_k агента ag_k продолжительность прохождения по этой траектории:

$$T(r_1, \dots, r_n) = \max_{k=\overline{1, n}} T_k(r_k) \rightarrow \min, \quad r_k \in \mathcal{Y}, k = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Также необходимо, чтоб в любой момент времени $t \in [0, T]$ отличие графов Φ и Γ было бы минимально

$$\text{dist}(\Gamma(t), \Phi(t)) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Таким образом, необходимо найти траектории $r_k \in \mathcal{Y}, k = \overline{1, n}$, являющиеся решениями задачи оптимизации с двумя целевыми функциями (1), (2).

Так как ни одному из агентов может быть не известна полная структура графа $\Gamma(t)$, то агенты решают вместо задачи (1), (2) приближенную задачу: они стараются выбрать такое направление движения, которое было бы компромиссным между направлением, минимизирующим $\text{dist}(\Phi(t), \Gamma(t))$ и направлением в сторону кратчайшего по времени пути. Чем больше агент имеет сведений о других агентах и о местности, тем больше вероятность получения решения, близкого к оптимальному. В известных работах об организации строя агентов (Н.С. Морозова, Ross Mead, Jerry B. Weinberg) влияние *ландшафта* с препятствиями на построение строя в полной мере не учитывается.

В третьей главе конструируется модель подсистемы связи многоагентной системы, моделируется процесс самоорганизации такой системы связи.

Данная система связи, подобна тем, что используются в тактическом звене управления воинским формированием у нас в стране и за рубежом. Одной отличительной чертой моделируемой системы является то, что канал связи между двумя агентами может состоять из нескольких каналов, организованных совершенно различно как на физическом уровне, так и на уровне протоколов. Другой чертой является неустойчивость системы военной связи. В один момент времени между агентами, которые, как правило, оснащены как высокоскоростными средствами с протоколами типа WiMAX или Wi-Fi, так и низкоскоростными узкополосными радиостанциями с нестандартизированными протоколами передачи данных, может быть организован высокоскоростной

канал, а в другой – только низкоскоростной, а в некоторые промежутки времени невозможно организовать никакого канала или возможно организовать только составной канал.

Вышесказанное делает довольно затруднительным моделирование канала связи на сетевом или канальном уровне. Более того, в военных условиях интерес представляет не доставка пакета, а именно доставка сообщения в установленный срок, так как ценность доставленной со значительной задержкой информации может оказаться нулевой. Поэтому моделирование производится на уровне сообщений, которыми обмениваются агенты, а не пакетов.

Предлагаемая модель сети связи состоит из двух частей – из меняющегося во времени в зависимости от местоположения связывающихся агентов графа системы связи, имеющего ребра, соответствующие каналам связи разного вида, и присвоенных вершинам графа системы связи расписаний рассылки сообщений по другим вершинам, причем скорость доставки сообщения зависит от вида канала между узлом-отправителем и узлом-адресатом. Таким образом, задачи, возникающие при исследовании модели, в некоторой степени аналогичны динамическим задачам теории расписаний, однако, в отличие от многих задач этого типа, допускают одновременное обслуживание произвольного количества требований. Заметим, что классические модели из теории телетрафика не вполне подходят – поступление сообщений в канал не случайно, а обусловлено расписанием. В разных каналах применяются различные протоколы, не всегда документированные, с разными максимальными скоростями передачи и дисциплинами обслуживания пакетов, что затрудняет имитационное моделирование в известных средах типа ns-3 или OMNeT++.

Клеточно-автоматная модель сети агентов.

Модель системы связи рассматривается как граф с «растяжимыми» ребрами (рис. 6), вершинами которого являются агенты из модели движения, описанной во второй главе, а ребрами – каналы связи между агентами. Ребра могут изменять свою «толщину» (пропускную способность) в зависимости от расстояния между агентами и *ландшафта* препятствий. Каждому агенту модели движения (агенту I-го рода) сопоставляется одно или несколько абстрактных средств связи (агенты II-го рода).

Множество ячеек автомата – это \mathbb{Z}^2 , а в качестве множества состояний будем рассматривать множество векторов типа

$$\mathcal{E} = F \times W \times Q \times U = \{(f_{ij}, w_{ij}, q_{ij}; u_{ij}) | (i, j) \in \mathbb{Z}^2\},$$

где для всех $i, j \in \mathbb{Z}^2$ $f_{ij} \in F = \{0, 1, 2\}$, $u_{ij} \in U \subset \mathbb{R}$ – ограниченное множество, $w_{ij} \in W \subseteq \mathbb{Z}^g$ – набор чисел, необходимый для реализации внутренней динамики клеточного автомата. Значение $f_{ij} = 0$ соответствует отсутствию, $f_{ij} = 1$ или $f_{ij} = 2$ – наличию в клетке (i, j) агента, принадлежащему к первой или второй противоборствующей стороне соответственно. Величина $q_{ij} \in Q \subset \mathbb{Z}^p$ соответствуют некоторому уникальному идентификатору агента, находящегося в клетке с координатами (i, j) . Этот идентификатор

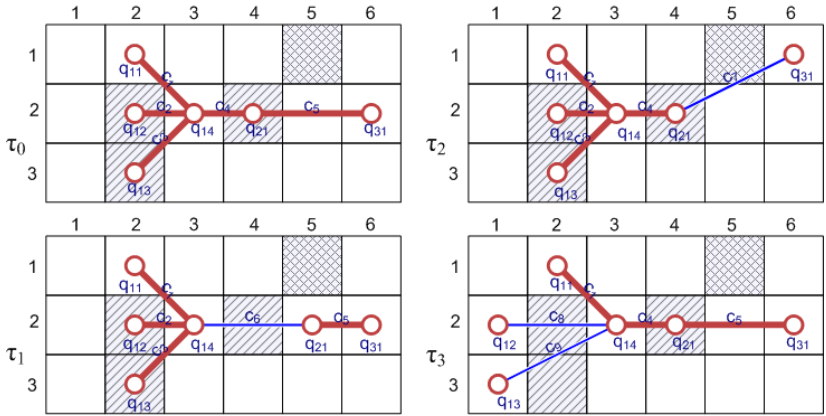


Рис. 6 — Поведение модельной системы связи. Штриховкой обозначена степень проницаемости клетки для радиоволн, чем гуще штриховка, тем хуже проницаемость

является вектором с целочисленными компонентами, так как в предыдущих работах автора рассматривались модели, учитывающие внутреннюю p -уровневую иерархию агентов. Компонента с номером $k = \overline{1, p-1}$ вектора q_{ij} соответствует номеру агента (группы агентов) k -го уровня иерархии внутри группы $k+1$ -го уровня иерархии, p -я компонента вектора q_{ij} соответствует номеру группы агентов (агента) самого верхнего уровня. Значения u_{ij} соответствуют некоторой характеристике местности, влияющей на распространение радиоволн (высота середины квадрата с координатами (i, j) над уровнем моря, лесистость, наличие зданий и т.п.).

Пусть задан граф потребностей в связи, указывающий на то, какие вообще агенты должны быть связаны друг с другом. Пусть $Q_f \subseteq Q$ – множество вершин-идентификаторов агентов, принадлежащих к стороне f , $E_f \subseteq Q_f \times Q_f$ – множество ребер, определяющее связность агентов. Определим граф потребностей в связи стороны f как $\Pi_f = (Q_f, E_f)$.

Система связи может изменяться в каждый момент $t \in \mathbb{Z}$, $t = \overline{0, N}$ функционирования клеточного автомата в зависимости от дальности агентов, особенностей местности, применения средств радиоэлектронной борьбы и т.п. Тогда граф системы связи с учетом перечисленных особенностей будет иметь вид:

$$\Gamma_f(t) = (V_f(t), C, \varphi_f(t, \cdot)),$$

где $f = \overline{1, 2}$, $V_f(t) = \{(i, j) \in \mathbb{Z}^2 | f_{ij}(t) = f\}$ – множество клеток, в которых в данный момент t находятся агенты стороны f , $C = \{c_1, \dots, c_l\}$ – множество каналов, $\varphi_f(t, \cdot) : C \rightarrow V_f(t) \times V_f(t)$ – функция инцидентности. Каждый элемент множества C может означать, например, канал (Hotspot) некоторой модификации Wi-Fi 802.11b в диапазоне ДМВ (300 МГц – 3 ГГц), канал определенной модуляции, например, ЧМ в диапазоне МВ (30 – 300 МГц) и т.п.

Модель самоорганизации системы связи.

Агенты получают информацию о других агентах и состоянии каналов, сканируя спектр и обмениваясь маяками. Один такт клеточного автомата соответствует полному циклу обмена пилот-сигналами и маяками. Подробное техническое решение, соответствующее предлагаемой модели, описано в патенте [33]. Пример конечного состояния автомата показан на рис. 7. Более светлый тон ячеек на изображении соответствует лучшему качеству соответствующих каналов. Мы можем видеть сеть $Net_1 = \{ag_i | i = \overline{1,4}\}$, образованную на канале f_1 , и $Net_2 = \{ag_i | i = \overline{5,6}\}$, образованную на канале f_2 .

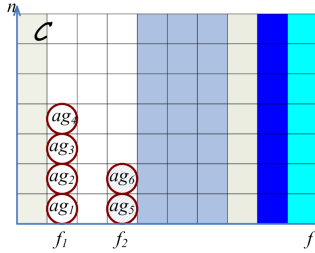


Рис. 7 — Финальная конфигурация автомата

С помощью модели системы связи получены результаты, позволяющие сказать, что самоорганизация агентов II рода в модели каналов связи подобна самоорганизации в известной в социологии модели Шеллинга II и описывается теми же дифференциальными уравнениями

$$\frac{dx}{dt} = [xR_X(x) - y]x, \quad \frac{dy}{dt} = [yR_Y(y) - x]y. \quad (3)$$

В системе (3) 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), например,

$$R_X(x) = \frac{e^{-6x} - e^{-6}}{1 - e^{-6}}, \quad R_Y(y) = \frac{e^{-6y/k} - e^{-6/k}}{2(1 - e^{-6/k})}.$$

Предлагаемый в описываемом подразделе алгоритм был разработан в качестве попытки ответить на вопрос: возможно ли создать полностью автономную сеть Cognitive Radio, без базовых станций или начального распределения спектра, или же координация с базовой станции необходима для распределения радиоканалов между агентами за конечное число итераций?

Целью подраздела является попытка разъединить самоорганизацию сети и ее радиофизическую основу и изучить самоорганизацию как чисто математическую задачу сегрегации.

Распределение частот в иерархической системе связи.

Формализована задача автоматизированного распределения частот в сложно организованной системе связи, на примере системы военной связи в тактическом звене управления. Рассматривается конкретная реализация распределения частот по устройствам как значение определенной производящей функции вариантов распределения, причем данная функция 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 наличествующих 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.

Задача распределения ограниченных ресурсов и построения оптимального расписания в сетевых структурах, в том числе и иерархических структурах транспортного типа, достаточно хорошо известна (М.Х. Прилуцкий, К.И. Дикарев, В.А. Виттих, П.О. Скобелев). Обычно в таких задачах необходимо распределить ресурсы между вершинами некоторого графа, причем поток ресурсов через ребра графа так или иначе ограничен. Решением таких задач будет, например, оптимальное в каком-либо смысле расписание или распределение ресурсов (не являющихся элементами самого графа) по вершинам графа.

В данном разделе описывается принципиально иной тип задач распределения ресурсов, часто встречающийся в задачах планирования военной связи, точнее, в задаче распределения и назначения частот. В описываемой задаче ресурсом являются сами ребра некоторого графа (соответствующие каналам связи), которые необходимо распределить между парами вершин в соответствии с заданным шаблоном. При этом характер взаимоотношений между агентами определенных типов в системе намного более постоянен, чем конкретный состав агентов. Решением такой задачи является вариант распределения каналов, отвечающий некоторым требованиям. Предложен подход к решению таких задач, ориентированный на работу не с конкретными агентами системы, а с абстрактной структурой системы агентов, независимой от самих агентов.

Перспективная система связи с возможностью защиты информации.

На основе предыдущих результатов разработана и смоделирована система связи, в которой с помощью маячков и сканирования эфира осуществляется не только распределение агентов по доступным каналам связи, но и исключение постороннего доступа в процесс самоорганизации, равно как и закрытие рассылаемой между агентами информации.

Радиосеть состоит из *nodenum* радиостанций и одной радиостанции – центра управления связью (ЦУС), которые в целях настройки могут работать на

freqnum частотных каналов ($freqnum > 1$), причем конкретный номер канала заранее неизвестен. Предположим, что используемые радиочастотные каналы пронумерованы числами из множества $F = \{1, \dots, freqnum\}$. Предполагается, что заранее сгенерирована ключевая пара из секретного ключа, который хранится в ЦУС, и открытого ключа, который распространен по всем радиостанциям сети. В качестве шифрования используется асимметричное шифрование, однако, вопросы собственно шифрования, стойкости криптосистемы и т.п. в разделе не затрагиваются, производится лишь конструирование и исследование обмениваемой сигналами-маячками системы агентов. Закрытый ключ должен будет содержаться лишь в одной радиостанции, находящейся в контролируемой зоне, а все другие радиостанции должны будут иметь только открытые ключи, сгенерированные на базе закрытого ключа. Распространение сеансовых ключей между радиостанциями и ЦУС происходит с помощью шифрования сеансового ключа открытым ключом ЦУС. Организации защищенной сети связи происходит в защищенном режиме посредством передачи по случайному радиоканалу сигналов-маячков, содержащих информацию для аутентификации, проверки целостности сообщения и асимметричного шифрования, одними радиостанциями (ЦУС), и сканирования набора каналов другими радиостанциями. Исследуются вопросы перенастройки сети при возникновении помехи на одном из каналов, на котором организована подсеть агентов.

В четвертой главе исследуется взаимосвязь клеточно-автоматной и дифференциальной модели движения агента по пересеченной местности. Получены оценки клеточного приближения траектории, доказаны теоремы существования решения. Предлагаемый клеточный автомат, моделирующий движение агентов, может быть рассмотрен как метод приближенного решения непрерывной оптимизационной задачи многоагентного поиска кратчайшего пути

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

$$\Theta(r_k, l) = \min\{t \in (0, T] \mid r_k(l_k(t)) \in \partial\Omega\} \rightarrow \min.$$

Здесь r_k – маршрут k -го агента, l – его натуральная параметризация, Ω – область, в которой перемещаются агенты, u – функция расположения

препятствий, κ , 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.

Введем следующие обозначения: $\|u\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}$ – евклидова норма вектора $u \in \mathbb{R}^n$, $u = (u_1, \dots, u_n)$, $W_p^m(A; \mathbb{R}^n)$ – пространства Соболева определенных на A функций со значениями в \mathbb{R}^n , которые вместе со своими m слабыми производными содержатся в $L_p(A; \mathbb{R}^n)$ с нормой

$$\|u\|_{W_p^m(A; \mathbb{R}^n)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{|\alpha| \leq m} \int_A |D^\alpha u_i(x)|^p dx \right)^{2/p}},$$

$C(A; \mathbb{R}^n)$ – пространство определенных на A непрерывных функций со значениями в \mathbb{R}^n с нормой $\|u\|_{C(A; \mathbb{R}^n)} = \max_{x \in A} \|u(x)\|$, $C^m(A; \mathbb{R}^n)$ – пространство m раз непрерывно-дифференцируемых определенных на A функций с нормой $\|u\|_{C^m(A; \mathbb{R}^n)} = \sum_{|\alpha| \leq m} \max_{x \in A} \|D^\alpha u(x)\|$.

В качестве множества маршрутов мы будем рассматривать $\mathcal{Y} \subset W_p^1(0, L; \mathbb{R}^2)$, состоящее из всех вектор-функций из $C([0, L]; \mathbb{R}^2)$, которые представимы в виде не более чем счетного множества дважды непрерывно дифференцируемых кусков, т. е. для любой $r \in \mathcal{Y}$ существует такое разбиение \mathbb{R} точками $\{t_i\}$, что $r|_{(t_i, t_{i+1})} \in C^2((0, L); \mathbb{R}^2)$, производные всех функций из \mathcal{Y} равномерно ограничены (кроме, возможно, счетного множества точек, в которых производной не существует), вторые производные всех функций из \mathcal{Y} равномерно ограничены в сумме:

$$\max_{l \in [0, L]} \|r'(l)\| \leq C_1, \quad \sum_i \max_{l \in (L_i, L_{i+1})} \|r''(l)\|^p \leq C_s,$$

где L_i – точки разрыва первой и второй производных r .

Существование оптимального решения задачи поиска кратчайшего пути во множестве функций \mathcal{Y} доказывается с помощью обычных средств функционального анализа, а именно, ищется минимизирующая функционал Θ последовательность, сходимость которой доказывается с помощью теорем о компактном вложении. В диссертации доказана

Теорема 1. *Функционал $\Theta : \mathcal{Y} \rightarrow \mathbb{R}$ достигает минимума на \mathcal{Y} .*

Далее строится алгоритм численного решения задачи построения скорейшего маршрута, в котором используется приближение гладкого маршрута r агента ломаной r_h , в которой отдельные звенья могут стыковаться только под 0, 45, 90, 180 градусов (множество таких ломаных обозначается $\mathcal{Y}(h)$), а функции расположения препятствий u – ступенчатой функцией. Имеет место следующее утверждение

Лемма 1. Пусть $r = (x(l), y(l)) \in \mathcal{Y}$, $r_h \in \mathcal{Y}(h)$ и h достаточно мало. Тогда справедлива оценка

$$\|r - r_h\|_{C[0,L]} \leq h\sqrt{2}. \quad (4)$$

Таким образом, при определенных условиях полученные приближения сходятся к оптимальному маршруту по норме $C([0,L], \mathbb{R}^2)$:

Теорема 2. Существуют такие $r_h^* \in \mathcal{Y}(h)$, минимизирующие функционал Θ_h , и такой $r_0^* \in \mathcal{Y}$, минимизирующий функционал Θ , что $r_h^* \rightarrow r_0^*$ в $C([0,L], \mathbb{R}^2)$ при $h \rightarrow 0$.

В пятой главе описывается программная среда «Психоход», применяемая для постановки вычислительных экспериментов, связанных с результатами диссертации и разработанная автором. Программная среда «Психоход» реализована на языке C++14 с применением библиотеки Qt5. Диаграмма компонентов UML для разработанной автором программной среды многоагентного моделирования «Психоход» показана на рис. 8. 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. Графический интерфейс программы показан на рис. 9.

С помощью программной среды «Психоход» проводились эксперименты по генерации случайных ландшафтов, исследованию зависимости скорости движения агентов от свойств ландшафта, скорости самоорганизации сети связи. Результаты экспериментов полностью подтверждают теоретические положения диссертации.

В заключении подводятся итоги диссертационной работы, формулируются ее основные результаты.

Основные выводы и результаты

В диссертации были получены следующие результаты.

1. Разработана формализованная модель управления подвижными агентами (роботами, БПЛА, солдатами), обменивающимися информационными сообщениями и командами по мобильной сети связи и стремящихся двигаться оптимальным образом в соответствии с заданными критериями. Управление в данной модели заключается либо в начальном задании целей и параметров агента, таких как радиус обзора, точка назначения, склонность к организации

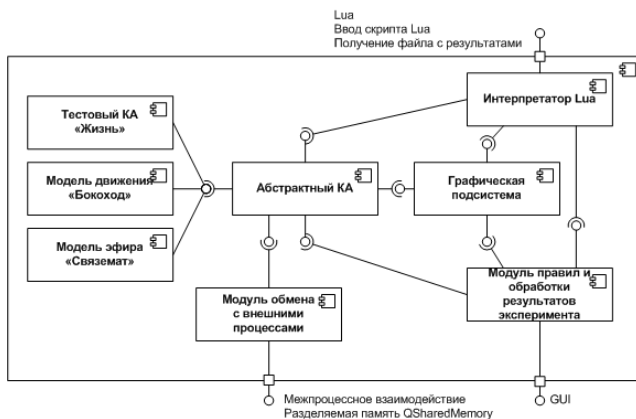


Рис. 8 – Схема взаимодействия модулей программной среды «Психоход»

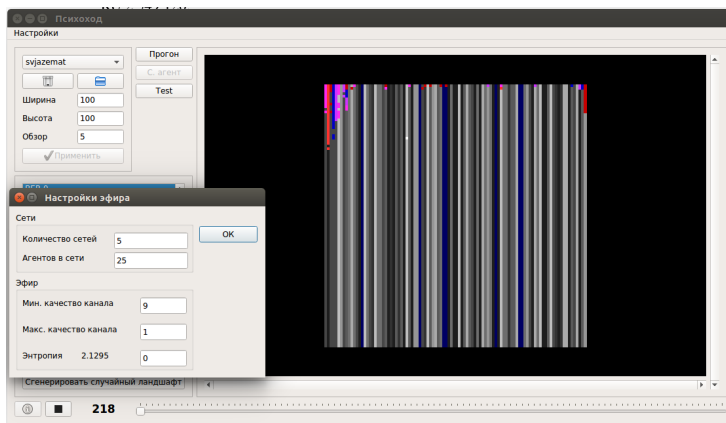


Рис. 9 – Программа «Психоход» в процессе сегрегации агентов

групп с другими агентами, скорость агента и т.п., либо в относительно нечастом изменении этих параметров в процессе функционирования системы агентов. Агенты сконструированы так, что их внутренняя система принятия решения позволяет им работать продолжительное время и достигать поставленных им целей без внешнего вмешательства. Предлагаемая в диссертации система связи между агентами может также функционировать без внешнего вмешательства и адаптироваться к изменениям помеховой обстановки, исчезновению отдельных агентов из сети и т. д.

2. Предложены дискретные модели движения, конфликта и связи агентов на основе клеточного автомата. Была также предложена непрерывная модель движения агентов, соответствующая дискретному аналогу. Оказалось, что исследуемый клеточный автомат соответствует конечно-разностной схеме для приближенного решения непрерывной модели движения агентов.

3. Разработано специальное программное обеспечение «Психоход», реализующее вышеуказанную модель и обеспечивающее визуализацию и анализ соответствующей информации. С помощью указанного программного обеспечения разработаны методы выявления зависимости эффективности поведения агентов (скорости движения, качества организации строя, скорости организации сети связи) от количества агентов и свойств местности, имеющих каналов связи.

4. Разработанная автором многоагентная система может применяться для моделирования поведения различных сложных систем, в том числе движения насекомых, микроорганизмов, системы кровообращения и т. п. Например, агентам могут соответствовать эритроциты, перемещающиеся по загроможденному разными препятствиями руслу кровеносной системы.

5. Исследованы зависимости скорости самоорганизации децентрализованной сети связи на основе *когнитивного радио* от количества агентов, подсетей и каналов связи и выявлено, что такая зависимость описывается известной из социологии моделью сегрегации Шеллинга тип II. Были разработаны алгоритмы, необходимые для автономного движения робота в соответствии с поставленными целями и для организации сети связи на основе *когнитивного радио*.

6. На основе проведенных вычислительных экспериментов были получены зависимости применяемых в ландшафтной экологии характеристик случайных *ландшафтов*, таких как «общий край» и конфигурационная энтропия. Вычислительные эксперименты показали зависимости времени движения агентов по пересеченной местности от свойств *ландшафта*,

- таких как «общий край» и конфигурационная энтропия;
- зависимость параметров интегральных характеристик движущейся системы агентов (например, концентрации агентов) от свойств *ландшафта*;
- характер распределения координат агента при движении по кратчайшему по времени маршруту и характер распределения времени прихода в целевую точку.

Перспектива исследования.

Дальнейшим развитием исследований может быть применение полученных результатов для создания проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Кузнецов А.В. Упрощенная модель боевых действий на основе клеточного автомата // *Известия РАН. Теория и системы управления*. — 2017. — Т. 56, № 3. — С. 59–71. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29369822>.

2. 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. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28918677>.
3. Kuznetsov A., Shishkina E., Sitnik S. Probabilistic Properties of Near-Optimal Trajectories of an Agent Moving Over a Lattice // *Journal of Optimization Theory and Applications*. — 2018. — Aug. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10957-018-1374-6>.
4. Kuznetsov A. V. On the Motion of Agents across Terrain with Obstacles // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. — 2018. — Jan. — Vol. 58, no. 1. — Pp. 137–151. — URL: <https://doi.org/10.1134/S0965542518010098>.
5. 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. — Vol. 33, no. 3. — Pp. 237–256. — URL: <https://doi.org/10.1080/17445760.2018.1439490>.
6. Kuznetsov A. V. Model of the motion of agents with memory based on the cellular automaton // *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*. — 2018. — Vol. 33, no. 3. — Pp. 290–306. — URL: <https://doi.org/10.1080/17445760.2017.1410819>.
7. Kuznetsov A. V. Segregation model for dynamic frequency allocation // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2018. — Vol. 18, no. 2. — Pp. 84–92. — URL: <http://ijassa.ipu.ru/index.php/ijassa/article/view/542>.
8. Kuznetsov A. Generation of a Random Landscape by given Configuration Entropy and Total Edge // *Computational Technologies*. — 2017. — Vol. 22, no. 4. — Pp. 4–10. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30053459>.
9. Кузнецов А.В. Моделирование системы связи агентов движущихся по пересечённой местности // *Челябинский физико-математический журнал*. — 2018. — Т. 3, № 2. — С. 237–248. — URL: <http://срмж.csu.ru/index.php/срмж/article/view/178/127>.
10. Кузнецов А. В. Динамическая модель системы связи группы агентов // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2018. — № 75. — С. 6–29.
11. Кузнецов А.В. Мера несходства на множестве графов и ее приложения // *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*.

- 2017. — Т. 1. — С. 125–131. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29185115>.
12. Кузнецов А. В. Организация строя агентов с помощью клеточного автомата // *Управление большими системами: сборник трудов*. — 2017. — № 70. — С. 136–167.
 13. Кузнецов А.В., Бессонов В.В. Описание математической модели системы связи // *Теория и техника радиосвязи*. — 2010. — № 2. — С. 58–64.
 14. Кузнецов А.В., Бессонов В.В., Кручинин С.В. и др. Объектно-лингвистическая модель единой среды визуального проектирования и формат хранения и переноса данных о системе связи на основе XML // *Вестник Воронежского Государственного Технического Университета*. — 2011. — Т. 7, № 8. — С. 56–60.
 15. Кузнецов А.В., Жарков С.Н. Настройка беспроводной сети специального назначения по защищенному радиоканалу // *Электросвязь*. — 2016. — № 12. — С. 28–35.
 16. 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.
 17. Кузнецов А. В. Краткий обзор многоагентных моделей // *Управление большими системами*. — 2018. — Т. 71. — С. 6–44.
 18. Квазиоптимальное распределение авионики на основе клеточного автомата и муравьиного алгоритма / А.В. Кузнецов, Н.И. Сельвесюк, М.Е. Семенов, Г.А. Платошин // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. — 2017. — № 4. — С. 38–45. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32497378>.
 19. Кузнецов А.В. Модель движения и взаимодействия системы интеллектуальных агентов // *Вестник ВГУ, Серия: системный анализ и информационные технологии*. — 2018. — № 2. — С. 130–138. — URL: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/analiz/2018/02/2018-02-16.pdf>.
 20. Application of cellular automatons and ant algorithms in avionics / A. V. Kuznetsov, N. I. Selvesiuk, G. A. Platoshin, E. V. Semenova // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2018. — Vol. 973, no. 1. — P. 012062. — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/973/i=1/a=012062>.
 21. Kuznetsov A.V. Cellular automata-based model of group motion of agents with memory and related continuous model // *Proceedings of the Mathematical Modeling Session at the International Conference Information Technology and*

- Nanotechnology (MM-ITNT 2017) / Ed. by Sergei Sazhin, Elena Shchepakina, Vladimir Sobolev, Denis Kudryashov. — CEUR Workshop Proceedings no. 1904. — Aachen: 2017. — Pp. 223–231. — URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1904/paper38.pdf>.
22. *Schumann A., Kuznetsov A.V.* Talmudic foundations of mathematics // BICT 2017 – 10th EAI International Conference on Bio-Inspired Information and Communications Technologies 10. — 2017. — Pp. 7–74.
 23. *Kuznetsov A.* Automatic role-oriented assignment of channels in the ad hoc network of hierarchically organized agents // В сборнике: BICT 2017 – 10th EAI International Conference on Bio-Inspired Information and Communications Technologies 10. — 2017. — Pp. 75–82.
 24. *Кузнецов А.В., Бессонов В.В.* Технология создания самоорганизующейся радиосети с функциями когнитивного радио на основе принципов программно-определяемого радио // Кибернетика и высокие технологии XXI века. XV Международная научно-техническая конференция. Воронеж: НПФ «Саквоее» ООО. — № 2. — 2014. — С. 176–187.
 25. *Кузнецов А.В.* Построение непрерывной модели направленного движения агентов по пересеченной местности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. — Т. 2. — Саратов: 2017. — С. 46–51.
 26. *Кузнецов А.В.* Построение непрерывной модели направленного движения агентов по пересеченной местности // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики сборник трудов Международной научно-технической конференции. — Воронеж: 2017. — С. 747–749.
 27. *Кузнецов А.В.* Децентрализованное управление строем агентов, основанное на клеточном автомате // В сборнике: Современные сложные системы управления. Материалы XII международной научно-практической конференции. — 2017. — С. 91–95.
 28. *Кузнецов А.В.* Анализ совместного движения системы агентов // В сборнике: Воронежская зимняя математическая школа С. Г. Крейна - 2016 материалы международной конференции. Под редакцией В. А. Костина. — 2016. — С. 242–245.
 29. *Кузнецов А.В.* Адаптивная иерархическая система связи, управления и поддержки принятия решений // В сборнике: РАДИОЛОКАЦИЯ, НАВИГАЦИЯ, СВЯЗЬ XXII Международная научно-техническая конференция. — 2016. — С. 269–277.
 30. *Кузнецов А.В.* Моделирование системы совместно движущихся агентов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики

Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященный 70-летию Победы в Великой отечественной войне. — 2015. — С. 287–289.

31. *Кузнецов А.В.* Модель системы связи мобильных агентов, соединенная с моделью движения, и ее реализация в среде «Психоход» // В сборнике: XXIV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC*2018). — Т. 5. — Воронеж: ООО «ВЭЛБОРН», 2018. — С. 351–360.
32. *Кузнецов А.В.* Вероятностные свойства квазиоптимальных траекторий агента, движущегося по решетке // СБОРНИК ТРУДОВ ИТНТ-2018. IV международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» 24 – 27 апреля. — Самара: Новая техника, 2018. — С. 2001–2009.
33. *Обельченко М.В., Бессонов В.В., Кузнецов А.В., Мохряков В.Б.* Средство передачи данных телекоммуникационной сети и телекоммуникационная сеть // Патент России № 2549120, опублик. 20.04.2015.
34. *Кузнецов А.В., Нестеренко А.В., Богатырев М.В., Пустовит В.П.* Способ организации защищенной системы связи // Патент России № 2644523, опублик. 2018/2/12.
35. *Кузнецов А.В.* Программа моделирования движения и боевых действий иерархически организованных агентов «Бокоход»; пр. для ЭВМ 2016615934. Заяв. и правообладатель Акционерное общество «Концерн «Созвездие». 2016613058 06.04.2016; опублик. 20.07.2016 // *Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем.* — 2016. — № 7. — 1 с.
36. *Кузнецов А.В., Лещев А.С.* Программная среда многоагентного моделирования «Психоход». Пр. для ЭВМ № 2017619605. Дата регистрации: 28.08.2017, номер и дата поступления заявки: 2017616880 11.07.2017. Правообл. А.В. Кузнецов, А.С. Лещев // *Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем.* — 2017. — № 9.

Кузнецов Александр Владимирович

Модели движения, взаимодействия и сети связи мобильных агентов в иерархических системах на основе клеточных автоматов

Автореф. дис. на соискание ученой степени докт. физ.-мат. наук

Подписано в печать 07.06.19. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,9.

Тираж 100 экз. Заказ 389.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии Издательского дома ВГУ.
394000, Воронеж, ул. Пушкинская, 3