

КАРПОВ Валерий Эдуардович

МЕТОДЫ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫМИ
АГЕНТАМИ НА ОСНОВЕ БИОЛОГИЧЕСКИ
ИНСПИРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт".

Официальные
оппоненты:

Кузнецов Олег Петрович
доктор технических наук, профессор, гл.н.с. Института
проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Редько Владимир Георгиевич
доктор физико-математических наук, гл.н.с. Центра
оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИ
системных исследований РАН

Ющенко Аркадий Семенович
доктор технических наук, профессор кафедры
"Робототехнические системы и мехатроника" ФГБОУ
ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ведущая
организация: Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ»

Защита состоится "___"____ 2023 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета 24.1.224.01 на базе ФИЦ ИУ РАН по адресу: 117312,
Россия, Москва, Проспект 60-летия Октября, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ИУ РАН по
адресу: Москва, ул. Вавилова, д.40 и на официальном сайте <http://www.frccsc.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью
учреждения, просьба высыпать по адресу: 119333, г. Москва, ул. Вавилова,
д. 44, корп. 2, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.224.01

Автореферат разослан "___"____ 2023 г.
Телефон для справок: 8 (499) 135-51-64

Ученый секретарь
диссертационного совета Смирнов Иван Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность

Одним из видов сложных распределенных систем являются системы групповой робототехники. Идейной основой групповой робототехники является тезис о том, что решение ряда сложных технических задач может быть получено путем использования большой совокупности взаимодействующих между собой сравнительно простых устройств – группы роботов. Такие групповые системы должны обладать свойствами надежности, масштабируемости и универсализма. Кроме того, в них предполагается неизбежное появление эмерджентных эффектов, определяющих новое качество подобного рода комплексов. Первые практически значимые результаты в этой области были получены уже около тридцати лет назад; с тех пор групповая робототехника (ГР) прочно заняла место в ряду магистральных направлений развития науки и техники. Вместе с тем есть все основания полагать, что ожидания оказались несколько завышенными, а в области ГР наблюдается ряд серьезных проблемных моментов.

Анализ состояния дел в ГР показывает, что, несмотря на ее декларируемое устойчивое и поступательное развитие, исследования в основном носят фрагментарный характер. Решаются самые разнообразные частные задачи из области группового взаимодействия, однако об общности подходов и методов приходится говорить гораздо осторожнее. Во-вторых, подавляющее большинство задач группового управления сводится к совместному движению, причем основанному на простейших формах взаимодействия членов группы. Более сложным формам поведения и способам взаимодействия (подражание, обучение, доминирование и т.п.) уделяется гораздо меньше внимания. В-третьих, характерным признаком является не просто появление множества поднаправлений ГР – стайная, коллективная, роевая и пр. робототехника, но перенос центра тяжести именно в область роевых систем, если понимать под этим группы агентов, определяющих свое поведение по характеру поведения своих соседей. В-четвертых, значительная часть исследований носит исключительно модельный характер, что не является достаточным для робототехники как принципиально технической области. Всё это, включая быстрый старт в конце 80-х гг. XX века при отсутствии до сих пор явных синергетических свойств групповых систем, а также превалирование централизованных способов управления в реально работающих проектах, неизбежно активизирует поиск общих парадигм, методологий и подходов к

решению задач группового управления.

Таким образом, научная проблема создания эффективных принципов и моделей группового управления роботами, функционирующими в сложных, динамических средах, является **актуальной**. Здесь речь идет о создании общих методологических принципов разработки систем ГР, позволяющих решать комплексные задачи группового управления и формирующих основу для появления явных синергетических эффектов. В качестве такой основы предлагается использовать парадигму моделей социального поведения роботов, суть которой сводится к тому, что проявление качественных, эмерджентных свойств в системах ГР возможно в условиях, при которых группа роботов образует т.н. социальное или, строже, социоподобное сообщество. При этом социоподобная организация сообщества роботов рассматривается как один из возможных адаптивных путей развития технической системы. Подчеркнем, что термин социум здесь рассматривается не как гуманитарное, а сугубо биологическое понятие. В биологии образование социальных сообществ рассматривается как вариант адаптации живых организмов к сложным или неблагоприятным условиям существования, причем этот способ обусловлен наличием ряда специфических механизмов внутригруппового взаимодействия.

Актуальность определяется также и практическим аспектом работы. В ходе исследования была сформулирована обобщенная задача – задача поддержания территориального гомеостаза (ТГ). К этой задаче сводится ряд практических задач групповой робототехники, таких как патрулирование, охрана территории, разведка, фуражировка и т.д. В диссертации показано, что функциональный базис решения задачи ТГ построен именно на механизмах социоподобного поведения.

Сегодня реализация принципов группового управления основывается на целом ряде исследований в области формальных моделей поведения, теории многоагентных систем, включая биологически инспирированные подходы. Исходя из этого, следует отметить классические работы из области моделей поведения (в т.ч. коллективного и группового) таких авторов как М.Л. Цетлин, В.И. Варшавский, М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов, В.Л. Стефанюк; в области многоагентного управления – В.Б. Тарасов, В.И. Городецкий, А.А. Кулинич; в области систем групповой робототехники – И.А. Каляев, С.Г. Капустян, В.М. Лохин, С.Л. Зенкевич, В.Е. Павловский, А.С. Ющенко; прикладные задачи групповой робототехники – А.Л. Ронжин; этология и социальное поведение – А.А. Захаров, Г.М. Длусский, Ж.И. Резникова,

А.А. Панов; поведение сетевых структур – О.П. Кузнецов; семиотические модели – Г.С. Осипов, теория аниматов и адаптивных агентов – В.Г. Редько, К.В. Анохин. Среди зарубежных исследований в этой и близких областях можно выделить работы В. Брайтенберга (V. Braitenberg) – применение языка психологии для описания поведения мобильных роботов; Р. Брукса (R. Brooks) – общая групповая робототехника и использование эмоций в робототехнике; Ц. Бризиел (C. Breazeal) – социальные аспекты робототехники; М. Дориго и Т. Лабелла (M. Dorigo, T.H. Labella) – муравьино-подобные модели поведения групп роботов; Дж. Эпштейн и Р. Акстелл (J.M. Epstein, R. Axtell) – исследования искусственных сообществ.

Анализ работ как вышеупомянутых отечественных, так и ряда зарубежных исследователей, позволяет сделать вывод, что концепция создания социальных сообществ искусственных агентов (роботов в частности) как общего подхода к групповому управлению является актуальной и новой постановкой задачи.

Цель и задачи диссертационного исследования

Настоящая диссертация посвящена разработке механизмов и методов, повышающих адаптивные способности групп искусственных агентов (роботов) и позволяющих решать широкий круг комплексных задач. Практические задачи ГР – патрулирование, охрана и мониторинг территории, рекогносцировка и т.п. – рассматриваются при этом как частные проявления общей задачи – устойчивого функционирования группы агентов на ограниченной территории. Базисом исследования являются биологически инспирированные модели социоподобного поведения. Формально это означает выявление и реализацию механизмов и принципов индивидуальной организации и межагентного взаимодействия, реализующих широкий спектр моделей поведения для решения задач группового управления.

Основной целью диссертации является расширение функциональных и адаптивных возможностей и областей применения групп искусственных агентов (роботов) при решении сложных задач в недетерминированных динамических средах на основе парадигмы моделей социального поведения.

Научная проблема, решение которой содержится в диссертации, – создание моделей, методов и алгоритмов, реализующих базис социоподобного поведения для организации управления и взаимодействия в группах искусственных агентов, функционирующих в сложных динамических и недетерминированных средах. Под базисом понимается необходимое и достаточное множество механизмов, определяющих как принципы

индивидуальной организации, так и способы внутригруппового взаимодействия группы агентов, образующих социоподобное сообщество. Создаваемые механизмы взаимодействия рассматриваются как способы повышения адаптивных способностей группы агентов. Исходя из этого, специфика механизмов заключается не в их "вычислительной" эффективности, а в универсализме метода решения задачи обеспечения устойчивости функционирования (выживания) групповой системы в сложных средах. При этом создание базисного набора таких механизмов и сведение множества решений частных прикладных задач к единой задаче выживания является принципиально новым подходом в групповом управлении.

В соответствии с поставленной целью для решения сформулированной научной проблемы определены следующие **задачи диссертационного исследования:**

1. Анализ моделей социального поведения, выделение их базовых компонентов и механизмов, формирование на этой основе концептуальной схемы построения социума искусственных агентов – роботов.
2. Разработка моделей и архитектур систем управления агентов (роботов), способных к социоподобному взаимодействию.
3. Разработка моделей и алгоритмов группового взаимодействия, обеспечивающих формирование социоподобных структур и определяющих способы целенаправленного управления социумом искусственных агентов.
4. Разработка комплекса программных и технических решений по реализации созданных моделей и методов для решения прикладных задач группового управления роботами.

Общая постановка задачи диссертационной работы заключается в создании базового набора моделей межагентного взаимодействия, позволяющего свести решения множества частных задач группового управления к обобщенной комплексной задаче – устойчивому функционированию социума искусственных агентов.

Методы исследований

В работе использованы оригинальные подходы и процедуры, разработанные автором, в том числе: принципы организации систем управления агентов, основанные на эмоционально-потребностной схеме; вариации семиотических моделей представления знаний для реализации феноменов подражательного поведения и социального обучения; методы манипуляционного управления поведением агентов; модель статического роя

как основа формализма описания процессов межагентного взаимодействия; многоуровневая автоматная модель описания сложных форм поведения агентов. Применялись также такие классические методы исследования, как: элементы теории множеств и дискретной математики; методы автоматного программирования; элементы теории автоматического управления; методы имитационного и агентного моделирования; этологические основания организации эусоциальных сообществ и элементы мирмекологии; семиотика.

Научная новизна и основные результаты диссертации

В ходе диссертационного исследования создан новый подход к организации группового управления, обеспечивающего формирование социоподобных сообществ искусственных агентов на основе разработанных биологически инспирированных моделей, методов и алгоритмов организации внутригруппового взаимодействия. Впервые предложено систематическое рассмотрение механизмов образования социума как пути развития адаптационных возможностей применительно к группам искусственных агентов – роботов.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Подход к организации группового взаимодействия искусственных, основанный на принципах построения социоподобных сообществ и позволяющий создавать их устойчивые образования для совместного решения комплексных задач.
2. Трехуровневая архитектура системы управления агента, состоящая из исполнительного, эмоционально-потребностного и когнитивного компонентов. Эта архитектура определяет особенности индивидуального поведения, обеспечивающие способность агента к социальному взаимодействию.
3. Модели и алгоритмы, реализующие базис механизмов группового взаимодействия, к которому сводятся феномены социального поведения: доминирование, когезия, контагиозное и подражательное поведение, социальное обучение и пр.
4. Модели и алгоритмы решения задач прикладного уровня: выбор лидера в группе агентов, основанный на динамическом определении доминанта и механизме голосования в однородной группе, модель ассоциативной памяти анимата, модель статического роя. Эти модели позволяют решать задачи согласованного поведения группы, распределенного хранения и обработки информации, оставаясь в рамках парадигмы моделей социального поведения.
5. Методы управления поведением социума искусственных агентов,

основанные на изменении характера индивидуального поведения. Этот подход позволяет, используя неизменный набор механизмов социоподобного взаимодействия, решать такие задачи группового управления как патрулирование, охрана и мониторинг территории, разведка и т.п.

6. Многоагентная система имитационного моделирования *KVORUM*, предназначенная для отработки моделей поведения и механизмов межагентного взаимодействия и обеспечивающая прямой перенос имитационных моделей на уровень реальных робототехнических систем.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается вычислительными экспериментами, апробацией на реальных робототехнических системах, а также реализацией полученных научных результатов в системах группового управления для решения прикладных задач.

Теоретическая и практическая значимость

Научная значимость работы заключается в том, что в рамках биологически инспирированных моделей поведения разработаны теоретические основы построения новой формы организации группового управления, основанного на принципах взаимодействия искусственных агентов, аналогичных тем, которые наблюдаются в социуме живых организмов.

Практическая ценность полученных научных результатов заключается в:

- повышении качества управления робототехническими комплексами за счет использования эффективных алгоритмов группового взаимодействия;
- расширении функциональных возможностей (поведенческого репертуара) систем групповой робототехники за счет реализации механизмов социальной самоорганизации в задачах группового патрулирования, разведки, охраны территории и пр.;
- формировании универсального ограниченного набора механизмов внутригруппового взаимодействия – базисного набора моделей поведения, – необходимого и достаточного для организации устойчивого функционирования технических систем в естественных средах.

Реализация и внедрение результатов работы. Основными результатами практического внедрения являются создание компонент системы управления коллаборативной тренировочной роботизированной мобильной платформой, решающей задачи мониторинга и разведки в условиях угрозы или возникновения чрезвычайных ситуаций (ООО «ЯРСПАС»), а также создание системы мониторинга прибрежной акватории группой малых автономных

необитаемых подводных аппаратов (ООО «Аварийно-спасательная служба Нефтегазового и Топливно-Энергетического Комплекса»).

Кроме того, результаты диссертационной работы использованы при выполнении госбюджетных НИОКР в НИЦ "Курчатовский институт", научным руководителем, ответственным исполнителем и непосредственным участником которых являлся диссертант, а также ряда проектов РФФИ и РНФ. Наиболее важными из них являются грант РНФ и 5 грантов РФФИ: грант РНФ 16-11-00018 (2016-2018) "Исследование методов организации коллектива роботов на основе моделирования эусоциальных сообществ" (руководитель); грант РФФИ №17-29-07083 офи_м "Исследование и моделирование механизмов регуляции социального поведения и обучения для группы автономных роботов" (руководитель); грант РФФИ 16-29-04412 офи_м (2016-2018) "Теоретические и экспериментальные исследования по организации и самоорганизации в группах роботов" (исполнитель); грант РФФИ № 15-01-07900 (2015-2017) "Разработка и исследование моделей и методов непосредственной языковой коммуникации на основе семиотических моделей для реализации социального поведения в групповой робототехнике" (руководитель); грант РФФИ 15-07-07483 (2015-2017) "Исследование методов и разработка алгоритмов картирования, локализации и автоматического планирования траектории сложных технических объектов, обладающих многими степенями свободы" (исполнитель); грант РФФИ 14-01-00817 "Модели социального поведения в групповой робототехнике" (руководитель).

Результаты работы также использовались при выполнении ряда НИР (Госзадание НИЦ "Курчатовский институт"; программа "Мониторинг-СГ"), в учебном процессе (МФТИ, НИУ ВШЭ). Внедрение результатов диссертации позволило расширить функциональные возможности и области применения автономных робототехнических комплексов. Акты о внедрении и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ приведены в тексте диссертации.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности "Системный анализ, управление и обработка информации, статистика" по формуле и по областям исследования: пп.3, 4, 5 и 9: (3) разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; (4) разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия

решений и обработки информации; (5) разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации; (9) разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались диссертантом и обсуждались на более чем 20 всероссийских и международных научно-технических конференциях и семинарах: Национальные конференции по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012, КИИ-2014, КИИ-2016, КИИ-2020; 12-я Мультиконференция по проблемам управления (с. Дивноморское, Геленджик, 2019); DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation (Vienna, Austria, 2014; Zadar, Croatia; 2018); конференция «Состояние и направления развития искусственного интеллекта – 2018» (КВЦ «Патриот»); международная научно-практическая конференция «Информатика и прикладная математика» (Алматы, Казахстан, 2017); 2nd International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” IITI 2017 (Varna, Bulgaria, 2017); IX World Conference on Intelligent Systems for Industrial Automation WCIS-2016 (Tashkent, Uzbekistan, 2016); Interactive Collaborative Robotics. First International Conference, ICR 2016 (Budapest, Hungary, 2016); VI, VII, VIII, X и XI Международная научно-техническая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте" (Коломна, 2011, 2013, 2015, 2021, 2022 гг.) и др.

Наиболее значимыми являются: доклад "Социальное поведение роботов. Промежуточные итоги исследований" на Общемосковском научном семинаре "Проблемы искусственного интеллекта" (РАИИ), 2017 г.; доклад "Социум роботов: химера или естественное развитие механизмов адаптации" на Московском этологическом семинаре (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН), 2019 г.; пленарный доклад "Модели социального поведения в групповой робототехнике" на XVII национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2019; доклад "Управление социальными сообществами роботов" на заседании Секции кибернетики Центрального дома ученых, 2019. В этих докладах предлагаемые модели и алгоритмы проходили апробацию как с формальной, технической точки зрения, так и с позиции их содержательной интерпретации, т.е. адекватности поведению животных.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты получены

лично автором. В монографии [1] автором предложена и описана сама концепция моделей социального поведения (МСП), написаны главы 1-4, 12-13 и п.5.5. В [2], [3], [16], [20] автору принадлежит постановка задачи и концепция морального агента, а также описание модели эмпатии. В [6] автору принадлежит собственно программная реализация системы моделирования. В [17] автором описана концепция МСП, частных механизмов взаимодействия агентов между собой и средой. В [7], [18] автором описана концепции МСП и ее базовых механизмов. В [10] автору принадлежит концепция архитектуры семиотической системы управления. В [12], [19] автору принадлежит собственно метод и алгоритм выбора лидера, модель статического роя. В [15] автором предложены модель пирамидного нейрона и структура системы управления робота.

Публикации. Полученные в диссертации результаты опубликованы в 47 печатных работах, из них: 1 монография, 11 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 19 – в изданиях из перечня ВАК и/или индексируемых в базах Web of Science Core Collection, Scopus, 28 – в изданиях, индексируемых РИНЦ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка из 291 наименования. Диссертация содержит 312 страниц текста, 14 таблиц, 132 рисунка, 17 страниц приложений.

Содержание работы

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, приводятся основные научные результаты, полученные в диссертации, сведения о практической ценности работы, а также дается краткий обзор содержания диссертации.

В первой главе на основе анализа исследований в области групповой робототехники (ГР) делается вывод о том, что подавляющее число исследований в ГР остается на теоретическом, модельном уровне, а сам декларируемый принцип решения сложных задач путем организации групп роботов на практике представлен реализацией весьма скромных, малосодержательных задач. Кроме того, сами типовые задачи ГР сводятся, в основном, к совместному движению.

Исходя из этого, в работе делается вывод о необходимости разработки единого, целостного методологического базиса или подхода, позволяющего рассматривать задачи совместного функционирования групп роботов не

фрагментарно, а комплексно. В качестве такого базиса предложено рассмотреть модели социальной организации, подобные тем, что наблюдаются в живой природе. При этом в парадигме моделей социального поведения (МСП) принципы организации сообществ роботов рассматриваются как некоторый универсальный адаптационный механизм.

Основная задача парадигмы МСП заключается в определении и реализации набора моделей и методов, задающих регуляторные механизмы высокоуровневого поведения, в т.ч. – социоподобного. В работе под социумом понимается специфическая форма организации взаимодействия между членами группы, обеспечивающая устойчивое с точки зрения поддержания числа ее членов функционирование в течение длительного промежутка времени. В ходе исследования были выявлены основные механизмы, обеспечивающие существование социума, внешними проявлениями которых являются феномены контагиозного (заразного, подхватываемого) поведения, когезия (стремление держаться вместе), подражательное поведение, агрессия и т.п.

В работе приведен ряд показательных примеров феноменов социоподобного взаимодействия (элементы пищевого поведения, формирование иерархически организованных групп, подражание, социальное обучение и др.), в основе которых лежит ограниченное число базовых механизмов. Кроме того, парадигма МСП определяет своего рода язык описания искусственных социумов. На нижнем уровне действия и комплексы действий определяются на автоматном языке; характер индивидуального поведения описывается на языке потребностей, эмоций и темперамента; описание взаимодействия индивидов и управление характером поведения всего социума использует понятия типа подражание, эмпатия, доминирование и т.п. Эти понятия как элементы языка позволяют не только интерпретировать поведение роботов в "социальных" терминах, но и формулировать задачи проектирования роботов и их систем. Важно, что за каждым термином этого описания стоит реальный механизм или модель, что придает парадигме МСП конструктивный характер.

В работе рассмотрены различные типологии социального поведения в живой природе. Особое внимание уделяется принципам организации т.н. эусоциальных (истинно социальных) сообществ, к которым относятся, например, общественные насекомые. Исходя из этого, были определены механизмы, лежащие в основе формирования социумов технических устройств и реализующие элементы социальной организации в группах роботов (Табл. 1).

Табл. 1. Перечень механизмов социального поведения

Тип сообщества		Механизмы поведения	
	Анонимные сообщества (без персонификации)	Открытые	1. Когезия (стремление держаться вместе) 2. Усвоение опыта старших поколений (обучение). 3. Система коммуникаций для взаимной координации и синхронизации деятельности.
		Закрытые	4. Агрессия к чужакам.
Социум	Индивидуализированные сообщества	По принципу лидерства	5. Персонификация в группе. 6. Социальное доминирование (поведение стаи зависит от поведения лидера). 7. Малая специализация. 8. Образование коалиций.
		По доминантно-иерархическому признаку	9. Специализация с разделением определенных функций (например, лидерства).
	Эусоциальные сообщества		10. Персонификация в группе (на уровне принадлежности к группе и выполняемой функции). 11. Строгая специализация.

В качестве базового модельного объекта были выбраны представители эусоциальных сообществ насекомых – муравьи рода *Formica*. Важным обстоятельством является то, что объект подражания, муравей, является крайне сложно организованным животным. В работе обосновывается, что способность к социальному взаимодействию требует весьма развитых когнитивных механизмов. В диссертации предлагается схема организации социоподобных сообществ, нижний уровень которой содержит разработанный автором перечень моделей и алгоритмов, необходимых для реализации различных феноменов социального поведения, а верхний уровень соответствует итоговому требуемому уровню организации социума (Рис. 1).



Рис. 1. Модели и методы реализации социоподобного поведения

Чтобы избежать механистического понимания сути парадигмы моделей социального поведения, следует отметить, что упомянутые выше механизмы, определяющие необходимые условия для образования социоподобных сообществ, – это не объект для реализации в парадигме МСП. Например, та же когезия – это лишь некоторое наблюдаемое свойство, а основная задача заключается в том, чтобы определить базовые механизмы, задающие такое поведение. Именно этому и посвящено настоящее исследование.

Вторая глава посвящена описанию организации индивида. Под индивидом далее, в зависимости от характера решаемых задач, понимается либо робот (технический аспект), либо анимат (поведенческий аспект), либо агент (абстрактная сущность). Основным вопросом второй главы является рассмотрение архитектуры индивида, способного к социоподобному взаимодействию. В основе разработанной архитектуры лежит эмоционально-потребностная модель, реализующая феномены эмоционального поведения роботов. Необходимость исследования этого вопроса связана с тем, что основной компонент парадигмы МСП – это поведение, а важнейшим фактором, регулирующим поведение, является то, что называется эмоциями. В качестве базовой теории эмоций была выбрана т.н. *Информационная теория* В.П. Симонова. Ее базовое предположение заключается в том, что эмоции являются оценкой текущей потребности (ее качества и ценности) и возможности ее удовлетворения. В общем виде отношение этих факторов описывается оценочным выражением:

$$E=f(N, p(I_{need}, I_{has})) \quad (1)$$

где E – эмоция, ее величина и знак (качество); N – сила и качество текущей потребности; $p(I_{need}, I_{has})$ – оценка возможности удовлетворить потребность на

базе врожденного и полученного жизненного опыта; I_{need} – информация о способе удовлетворения потребности; I_{has} – информация об имеющихся у субъекта средствах, ресурсах и времени. Развитие этой качественной модели заключалось в следующем.

Поведение агента определяется множеством продукции R , сенсорами S и потребностями N : $Agent = \langle S, N, R \rangle$. Правила R представлены в MYCIN-подобной форме, т.е. как множество продукции с коэффициентами уверенности: $(Cond_1 \& \dots Cond_k) \rightarrow f_i, (w_i)$. Здесь $Cond_i$ – конъюнкты условия, $Cond_j \in [0,1]$; f_i – заключение, т.е. номер выполняемого действия, $f_i = 1..L$, L – количество действий (поведенческих процедур), которое выполняет агент; w_i – коэффициент уверенности i -го правила, $w_i \in [0,1]$, $i = 1..L$. Смысл продукции заключается в вычислении оценки A_f (коэффициент уверенности заключения) того, что будет совершено действие f . A_f вычисляется как $A_f = w_i \min(Cond_k)$. Множество R может содержать несколько правил с одинаковым заключением f . Тогда итоговый коэффициент A_f для подтверждающих правил R_i и R_j , дающих оценки A_f^i и A_f^j соответственно, определяется как $A_f = A_f^i + A_f^j - A_f^i A_f^j$. Итак, продукции определяют выполняемые агентом действия, которые могут быть сложными и относиться к категории поведенческих процедур. Предположим далее, что каждая продукция R_i задается еще и указанием базовой потребности $N_{det}^i \in N$, $N_{det}^i \in [0,1]$, на удовлетворение которой направлено это действие:

$$R_i: (N_{det}^i, \{Cond_i\}) \rightarrow f^i, (w_i), f^i = 1..L. \quad (2)$$

Вычисление A_f заключения – это не запуск соответствующей процедуры, а лишь оценка готовности совершить действие: множество продукции R порождает вектор коэффициентов уверенности выполняемых действий A . Введем эмоциональный компонент, представив выражение (1) в следующем виде:

$$E = N \times (I_{has} - I_{need}). \quad (3)$$

Это – тоже оценочная формула, в которой фигурирует разность между тем, что необходимо и тем, что имеется реально. Пусть, во-первых, в каждый момент времени агент выполняет только одно действие, а, во-вторых, имеется множество действий, которые анимат мог бы выполнить с тем или иным коэффициентом уверенности. Тогда I_{need} – это вектор коэффициентов уверенностей заключений требуемых (желаемых) правил-действий ($I_{need} = A$), а I_{has} – вектор актуально исполняемых в данный момент времени действий: $I_{has} = A^{actual}$, $A_i^{actual} = 1$, если i – номер актуального действия ($A_i^{actual} \in \{0,1\}$). Таким

образом, вычисляя A_i для всех правил в текущий момент, можно определить эмоциональные оценки E_i для всех действий (частные эмоции):

$$E_i = k_{em} (A_i^{actual} - A_i), i=1..L. \quad (4)$$

Здесь k_{em} – некоторый коэффициент, введенный в силу того, что потребности N используются при вычислении вектора A . Очевидно, что если $A_i^{actual} - A_i < 0$ (ситуация, когда не выполняется желаемое действие i , т.е. $A_i > 0$, $A_i^{actual} = 0$), то у агента возникает частная отрицательная эмоция. Полной оценкой эмоционального состояния агента является величина $E = \sum_{i=1}^M E_i$.

Для учета влияния эмоций введем дополнительные элементы – множество шлюзов G . Они нужны в силу того, что эмоциональная оценка действия (частная эмоция) не может воздействовать на сенсорику и тем более – на потребности. Шлюзы – это элементы, которые ставятся во взаимно однозначное соответствие сенсорам. Таким образом, подтверждающие условия $Cond_i$ становятся функциями от значений потребностей и значений шлюзовых элементов:

$$Cond_i = F_i(N_i, G_i), N_i \subseteq N, G_i \subseteq G. \quad (5)$$

Выходное значение шлюза G_i определяется как функция от значения соответствующего сенсора S_i и множества эмоциональных состояний правил Es_i (т.е. множества эмоциональных сигналов от процедур, с которыми связан шлюз):

$$G_i = G_i(S_i, Es_i), S_i \in S, Es_i \subseteq R. \quad (6)$$

Для каждого сенсорного элемента S создается шлюз G , который определяет правило сочетания сенсорных восприятий и эмоциональных состояний. Например, для шлюза G_i оно может выглядеть так:

$$G_i = k_{ext} (S_i \oplus \sum_{j \in Es_i} E_j). \quad (7)$$

Здесь k_{ext} – константа (коэффициент возбуждения), а \oplus – некоторый аналог операции сложения, ограничивающий результат диапазоном $[0,1]$, например, операция вида $x \oplus y \equiv x + y - xy$. В итоге функционирование эмоционально-потребностной схемы поведения агента выглядит так:

1. Вычисление вектора коэффициентов уверенности заключения правил:

$$A = R(k_{ext}, N, S, G). \quad (8)$$

2. Формирование вектора актуально выполняемых действий A^{actual} , определяющего единственное выполняемое в данный момент дискретного времени t действие $proc$:

$$nproc = \arg \max Y_i \quad (9)$$

$$Y_i(t) = A_i - k_{fb} \sum_{j \neq i}^M Y_j(t-1) \quad (10)$$

В выражении (9) для вычисления $nproc$ используется вектор $Y(t)$, необходимый для стабилизации выходного вектора: $|Y|=L$, $Y_i(0)=0$, $i=1..L$. Фактически, это – низкочастотный фильтр для вектора A . Именно значения Y определяют итоговый номер запускаемой процедуры.

$$A_i^{actual} = \begin{cases} 1, & i = nproc \\ 0, & i \neq nproc \end{cases} \quad (11)$$

3. Вычисление вектора эмоций E : $E = k_{em}(A^{actual} - A)$.

4. Запуск поведенческой программы $nproc$, соответствующей максимально обусловленному действию.

Алгоритм определения действия (поведенческой процедуры) приведен ниже:

```
-- Шаг 1. Вычисление выходных значений вентильных элементов G
for i in dim(G) do
    G_i <- k_ext(S_i ⊕ (sum (e_j) for j in Es_i))
-- Шаг 2. Вычисление вектора коэффициентов уверенности заключений правил
for i in L do
    A_i <- evaluate(R_i)
-- Шаг 3. Выходные значения Y. Реализация принципа "победитель забирает
всё"
for i in L do
    Y_i <- A_i - k_fb * (sum(Y_j) for j ≠ i)
-- Шаг 4. Aactual – вектор фактически выполняемых процедур
nproc <- arg max(Y)
for i in L do
    A_iactual <- 1, если i=nproc, иначе 0
-- Шаг 5. Вычисление частных эмоций
e <- k_em * (Aactual - A)
E <- sum(e)
-- Шаг 6. Возврат искомого значения – номера исполняемой процедуры nproc
Return nproc
```

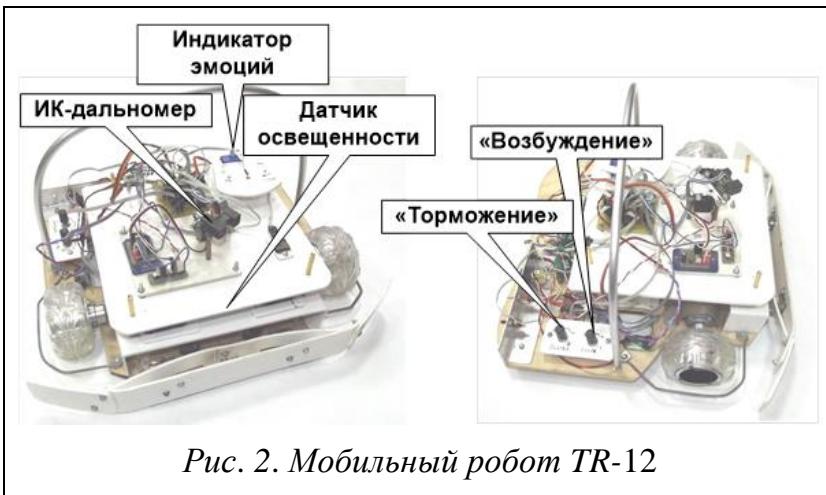
Итак, влияние эмоций на совершение действия реализуется как обратная связь между выходным сигналом (текущее действие) и поведенческими правилами. Следующий шаг – переход от эмоций к описанию характера поведения агента. Одной из систем для оценки психологических особенностей поведения животных является т.н. темперамент. Типы темперамента (меланхолический, холерический, сангвинический и флегматический) основываются на балансе между возбуждением и торможением и их "силе". В данном исследовании поведенческие реакции также описаны двумя факторами: величиной и соотношением процессов возбуждения и торможения. В этих терминах типы темперамента можно представить так:

Табл. 2. Двухпараметрическая типология темперамента

Характер	Уровень возбуждения	Уровень торможения
"Меланхолик"	Низкий	Низкий
"Холерик"	Высокий	Низкий
"Сангвиник"	Высокий	Высокий
"Флегматик"	Низкий	Высокий

В таком случае поведение робота (анимата) характеризуется следующим образом: (1) "меланхолик": большая временная задержка ответа, ответ поддерживается в течение долгого времени; (2) "холерик": короткая временная задержка ответа, но ответ поддерживается в течение относительно долгого времени; (3) "сангвиник": быстрые, импульсивные и относительно непродолжительные реакции; (4) "флегматик": длительная временная задержка и непродолжительный ответ. В данной работе торможение и возбуждение используются как параметры обратной связи в системе управления роботом.

Проверка разработанных моделей включала в себя проведение серии вычислительных экспериментов и натурных испытаний на базе мобильного робота *TR-12* (Рис. 2). Темперамент робота задавался регуляторами "Возбуждение" и "Торможение", позиции которых определяли значения соответствующих параметров.



Эксперименты подтвердили, что положительные эмоции стабилизируют поведение робота, а отрицательные усиливают и контрастируют восприятие робота, отвечают за инициацию поисковых процедур и являются инициаторами

активности агента, направленной на удовлетворение актуальной потребности. Итак, если механизм эмоций обеспечивает оценку текущей ситуации и принятие решений, то темперамент определяет параметры этого механизма.

Для формального анализа особенностей поведения агентов в работе используется конечно-автоматная модель, основанная на подходах школы М.Л. Цетлина в области поведения автоматов. При этом параметры возбуждения и торможения, баланс между которыми определяет темперамент,

интерпретируются в терминах автоматных структур.

Линейный автомат (автомат с линейной тактикой) $L_{fn,f}$. Величина параметра "возбуждение" определяет тенденцию перехода автомата в *удаленное* состояние q_n^i некоторой выбранной ветви i при получении сигнала поощрения, а "торможение" – тенденцию автомата к сохранению выбранной тактики при наказании. Чем ниже величина торможения, тем более склонен автомат к смене действия, т.е. к переходам в состояния q_i^1 . В этом смысле линейный автомат может характеризоваться низким уровнем возбуждения и низким уровнем торможения. С точки зрения темперамента его можно считать "меланхоликом".

Автомат $D_{fn,f}$ ("доверчивый автомат"): получив сигнал поощрения, сразу переходит в самое глубокое состояние, соответствующее этому действию. *Автомат $N_{fn,f}$* (недоверчивый автомат): получая сигнал поощрения, последовательно переходит в более глубокое состояние, а получив сигнал наказания, меняет свою тактику: из состояния q_i^a (действие f_a) переходит в состояние q_i^{a+1} (действие f_{a+1}). *Автомат $P_{fn,f}$* (пессимистический автомат): – это некоторая модификация автомата $N_{fn,f}$, при наказании он не меняет сразу свою тактику, однако переходит в состояние, близкое к точке смены действия: из состояния q_i^a переходит в состояние q_1^a (Рис. 3,а).

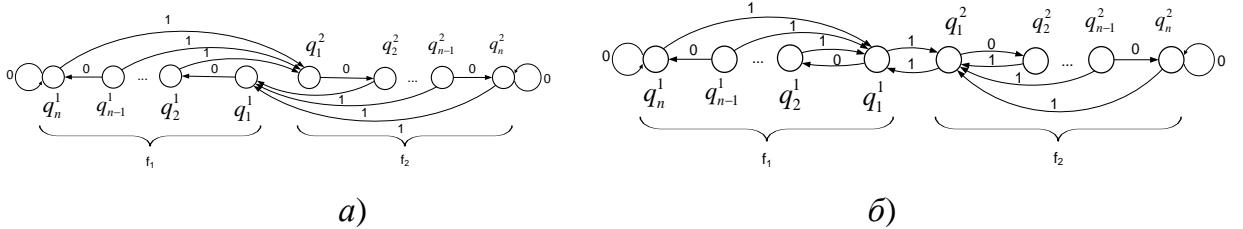


Рис. 3. а) "Недоверчивый" автомат, б) "пессимистический" автомат

Автомат L_{ff} . Частный случай автомата с линейной тактикой $L_{fn,f}$, у которого количество действий равно количеству состояний. Такой автомат немедленно реагирует на сигнал наказания, меняя свое действие. Поведение такого автомата можно считать "неврастеничным".

Табл. 3. Соответствие конструкции автомата и темперамента

Уровень возбуждения	Уровень торможения	Темперамент	Автомат
Низкий	Низкий	"Меланхолик"	Автомат с линейной тактикой $L_{fn,f}$
Высокий	Низкий	"Холерик"	"Неврастеничный" автомат L_{ff}
Высокий	Высокий	"Сангвиник"	"Доверчивый" автомат $D_{fn,f}$
Низкий	Высокий	"Флегматик"	"Недоверчивый" автомат $N_{fn,f}$ или "Пессимистический" автомат $P_{fn,f}$

Далее в работе рассматривается вопрос поведения автоматов в сложных, составных средах. Составная среда K состоит из стационарных случайных сред и описывается цепью Маркова $K(C^{(1)}, \dots, C^{(V)}, \Delta)$. Каждое состояние $C^{(i)}$ соответствует стационарной случайной среде $C^{(i)} = C(a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i)$, а Δ – матрица переходных вероятностей. Эффективность поведения автомата в некоторой составной среде зависит от его структуры и глубины памяти. Каждая составная среда K характеризуется следующими параметрами:

1. Свойства входящих в ее состав стационарных случайных сред. Каждая стационарная среда $C^{(i)}$ имела одинаковую структуру

$$C^{(i)} = C(-a, \dots, a, \dots, -a), \quad a_j^i = \begin{cases} a, & i = j \\ -a, & i \neq j \end{cases}$$

и определялась одним параметром a . Этот параметр (матожидание выигрыша) задавал своего рода степень "предрасположенности" среды к тому или иному действию.

2. Свойства матрицы переходных вероятностей Δ . Матрицы различались по структуре (характеру составной среды или типу) и по значению вероятностей переключений δ . По структуре были выделены два типа:

а) Тип "стационарный". Эта "почти стационарная" среда описывалась

следующей матрицей: $\Delta_{ij} = \begin{cases} \delta, & j = 0 \\ \frac{1-\delta}{n-1}, & j \neq 0 \end{cases}$, здесь n – количество сред.

б) Тип "переключатель". С большей вероятностью система сохраняет свое текущее состояние, нежели реализует переключение на другие стационарные

среды: $\Delta_{ij} = \begin{cases} \delta, & i = j \\ \frac{1-\delta}{n-1}, & i \neq j \end{cases}$

Результаты проведенных серий вычислительных экспериментов показали, что для каждой среды можно выбрать наиболее подходящий для нее автомат, причем подходящий – в терминах темперамента (Табл. 4). Для этого необходимо задать некий функционал качества, например, аналог времени переходного процесса.

Табл. 4. Сводная таблица экспериментов

Эксперимент	a	δ	Тип матрицы Δ	Характер
LD	0.2	0.99	Стационарный	L – "меланхолик"
D	0.5	0.90	Переключатель	D – "сангвиник"
L33	0.75	0.6	Переключатель	L_{ff} – "холерик"
PN	0.75	0.75	Переключатель	N и P – "флегматики"

С точки зрения интересов ГР значимость этих результатов определяется так. Иногда успешное решение задачи требует группы роботов с различной "психической" организацией: меланхолическими, холерическими, сангвиническими и флегматичными роботами. Один робот быстро принимает решения, а другой глубоко анализирует; один быстро реагирует на изменения окружающей среды, а другой характеризуется стабильностью ("терпением").

Далее для определения сложных действий, вплоть до реализации поведенческих процедур, в работе предложена многоуровневая мета-автоматная схема управления. Если действиями конечного автомата (КА) являются активизации низкоуровневых двигательных функций, то мы считаем его автоматом уровня $0 - M^0$. Мета-автомат M^1 уровня 1 – это КА, действия которого заключаются в управлении автоматами M^0 (запуск, останов, возобновление работы). Таким образом, мета-автомат M^n уровня n управляет автоматами уровня $(n-1)$. Введение понятия мета-автомата – это структуризация иерархии управления в автоматном представлении, а основа автоматов всех уровней – это КА с выходом.

В итоге получается следующая иерархия компонентов архитектуры: (1) уровень действий, реализуется множеством КА; (2) уровень поведения; поведенческие реакции как последовательности действий, определяются мета-автоматами и (3) рефлекторный регуляторный уровень, реализуемый эмоционально-потребностной схемой. На выходе – выбор поведения, т.е. активизация мета-автомата, соответствующего выбранному поведению. Эта архитектура соответствует низшему (базовому) рефлекторному уровню организации. Дальнейшее развитие организации системы управления (СУ) определяется такими надстройками, как организация знаковых (семиотических) уровней. Схема обобщенной архитектуры системы управления аниматом приведена на Рис. 4.

Е – эффекторный уровень; здесь реализуются движения, элементарные воздействия на окружающую среду. А – уровень действий; реализуется с помощью конечных автоматов. В – уровень поведения; реализуется с помощью мета-автоматов. Р – регуляторный уровень; это – эмоционально-потребностная схема. С – когнитивный уровень; часть, ответственная за отображение сенсорных и потребностных элементов. Этот уровень называется *моделью мира*, здесь формируется мотивация и целеполагание, осуществляется планирование и т.п. Реализуется семиотическими моделями.

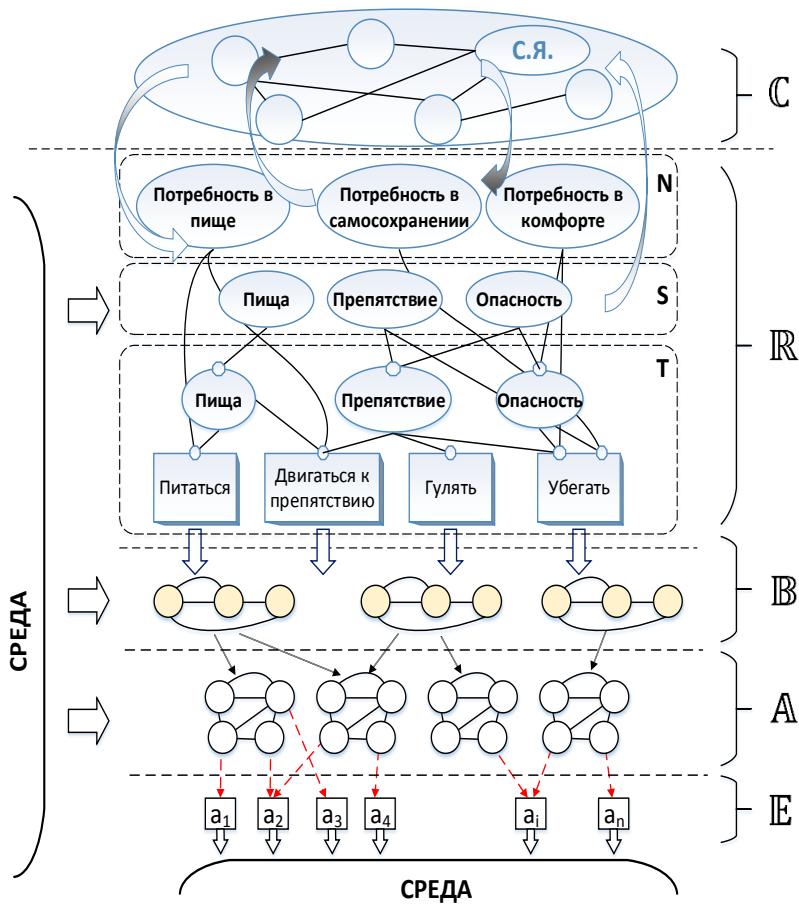


Рис. 4. Архитектура анимата

$$Y_B \xrightarrow{a} M_i^n \xrightarrow{a} M_j^{n-1} \xrightarrow{a} \dots \xrightarrow{a} M_k^0 \xrightarrow{a} Y_{eff}$$

Здесь Y_B – вектор активации мета-автомата, определяющего выбранное актуальное поведение, \xrightarrow{a} – отношение непосредственного автоматного управления, задаваемое соответствующими функциями выхода автоматов λ : $Y^k = \lambda(Q^k, S^k)$, $S^k = X \cup f(Q^{k-1})$, где Q^k , S^k – состояния и входной алфавит мета-автомата уровня k соответственно. При этом S^k определяется как объединение внешних сигналов (сигналов среды) и текущего состояния подчиненного автомата уровня $(k-1)$.

Вектор активации поведения Y_B задается функционированием регуляторного уровня \mathbb{R} :

$$Y_B = \mathbb{R}(S, N, G)$$

где S , N , G – сенсорные сигналы, потребности и вентильные элементы эмоционально-потребностной схемы.

Задача когнитивного уровня \mathbb{C} – формировать целенаправленное поведение агента, при этом воздействие на регуляторный уровень осуществляется опосредованно, через элементы G (сенсорика и потребности – это фиксированный, "аппаратный" уровень архитектуры): $G = \mathbb{C}(S, N)$.

Уровни \mathbb{E} , \mathbb{A} , \mathbb{B} и \mathbb{R} относятся к рефлекторному уровню управления. На уровне \mathbb{R} выделяются потребностная (N), сенсорная (S) и стабилизирующая (T) части. Формально это можно описать так. Пусть Y_{eff} – вектор выходных эффекторных воздействий анимата на среду. Его формирование определяется результирующим выходом последовательности $(n+1)$ мета-автоматов M^k , $k=0..n$.

В итоге получаем: $\mathbb{R}(S, N, \mathbb{C}(S, N)) \Rightarrow^M Y_{eff}$. Здесь \Rightarrow^M – транзитивное замыкание отношения автоматного управления \Rightarrow^a .

Разработанные архитектуры организации индивида и системы управления аниматом определяют особенности решения прикладных задач, основанных на управлении индивидуальным поведением и поведением всего социума.

Третья глава посвящена рассмотрению базовых механизмов и феноменов социоподобного поведения, т.е. вопросам группового взаимодействия. Здесь крайне важным обстоятельством является то, что эти механизмы основаны на локальном характере взаимодействия между агентами (аниматами).

Для описания совокупности взаимодействующих агентов в работе вводится понятие *статического роя*. Статический рой (СР) характеризуется отсутствием изначально заданного управляющего центра и представляет собой некую фиксированную в данный момент времени сеть – совокупность агентов. Основные свойства СР – это активность, локальность взаимодействия и функциональная неоднородность. Под активностью понимается способность к восприятию сигналов внешней среды, а также способность оказывать влияние на внешний мир. Предполагается, что агенты – элементы СР – хранят множество утверждений c_i , которые могут рассматриваться либо как факты, либо как логические выражения (в работе исследовались импликации вида $c_1 \& \dots \& c_n \rightarrow f$, на основе которых реализовывались элементы логического вывода). Для СР в диссертации разработан ряд методов, реализующих задачи хранения информации и организации запросов к ней, выполнения согласованных двигательных функций и пр.

Ключевым вопросом организации взаимодействия агентов является неоднородность группы. Основным фактором неоднородности является лидер или доминант, поэтому крайне важно определить, каким образом формируется этот лидер – центральный или инициирующий узел. В работе предложено два метода выбора лидера в статическом рое.

(1) *Прямое определение лидера (выделение доминанта)*. Это – сугубо технический прием, позволяющий определить координирующий центр для выполнения согласованных действий в группе (например, для решения задачи стайной охоты). Когда образуется связанная коммуникационными каналами группа, то члены группы оценивают "вес" своих соседей и сравнивают со своим. Если вес некоторого агента оказывается выше весов своих соседей (он – самый "сильный"), то этот агент становится лидером и не придерживается

правила "Держаться вместе". Агент начинает свободный поиск, а все остальные следуют за ним. Здесь мы имеем дело с анонимным сообществом, в котором формируется временный лидер. При такой организации рой превращается в стаю: стая характеризуется наличием лидера. Формально это описывается следующим алгоритмом поведения агента:

```

 $\alpha$  - агент,  $W_a$  - вес агента
Procedure MakeAction( $\alpha$ )
     $W \leftarrow \{W_i\}$  -- Определение весов соседей  $W$ 
     $W_{\max} \leftarrow \max(W)$ ,  $A_{\max} \leftarrow \arg \max(W)$ 
    if  $W_{\max} > W_a$  then MoveTo( $A_{\max}$ ) -- Двигаться к агенту  $A_{\max}$ 
    else MakeSomething( $\alpha$ ) -- Выполнять собственную поведенческую
процедуру
end procedure

```

Очевидно, что временная сложность алгоритма определяется как $O(\rho)$, где ρ – среднее число соседей агента.

(2) *Голосование в статическом рое.* Развитием принципа выделения доминанта, основанного на локальном взаимодействии и ориентации на более сильного соседа, является процедура выбора лидера в статическом рое. Речь идет о том, чтобы агент поступал (выбирал) в соответствии с мнением окружающего его большинства.

Пусть имеется множество из K агентов, способных лишь к непосредственному локальному взаимодействию между соседями. Задача состоит в том, чтобы агенты выбрали единственного лидера путем голосования. При этом общая топология сети агентам заранее неизвестна и все рассуждения должны носить сугубо "локальный" характер, т.е. идти от имени агента, принимающего участие в голосовании. Каждый агент описывается четверкой $A = (\alpha, L, C, W_C)$, где α – идентификатор или имя агента; L – список агентов-соседей, от которых агент может получать информацию; C – идентификатор или имя "кандидата" ($C=1..K$), за которого голосует агент α ; W_C – вес кандидата C , т.е. число голосов, которое, по мнению агента, следует отдать за кандидата ($W_C=1..K$). Изначально каждый агент голосует за себя, т.е. $C=\alpha$, $W_C = W_\alpha = W_\alpha^0$ (W_α^0 – исходный вес агента, показатель его силы, значимости и т.п.). В худшем случае, когда все агенты одинаковы, их веса W_α^0 равны. Далее каждый агент определяет, за кого голосуют его соседи. При этом в зависимости от веса кандидата, за которого голосует сосед, агент может поменять свое мнение и проголосовать за того же кандидата, что и его сосед. Вероятность того, что агент i изменит свое мнение под влиянием мнения агента j (оппонента), может быть определена так: $p_{ij} = \frac{W_i}{W_i + W_j}$. Алгоритм голосования агента, в котором

выбор определяется вероятностным образом и зависит от веса кандидатов, приведен ниже.

Алгоритм $G1(\alpha)$. Принятие решения агентом

```

 $\alpha$  – агент,  $C_\alpha$  – кандидат, за которого голосует агент  $\alpha$ 
 $W_\alpha$  – вес кандидата,  $L_\alpha$  – список агентов-кандидатов
Procedure  $G1(\alpha)$ 
    -- Выбор среди соседей оппонента с максимальным весом  $A_{op}$ :
     $A_{op} \in L_\alpha, C_{op} \neq C_\alpha$ 
     $W_{op} = \max_{i \in L_\alpha} W_i$ 
    -- Вычисление значения вероятности изменения своего мнения:
     $p_\alpha = \frac{W_{op}}{W_\alpha + W_{op}}$ 
    Изменение мнения с вероятностью  $p_\alpha$ :
     $C_\alpha \leftarrow C_{op}$ 
     $W_\alpha \leftarrow W_{op} + 1$ 

```

В аналогичном алгоритме $G2$ агент безусловно голосует за сильнейшего кандидата. Общая схема процедуры представлена алгоритмом $V(A)$.

Алгоритм $V(A)$. Голосование

```

 $A$  – множество агентов
 $C_\alpha$  – кандидат, за которого голосует агент  $\alpha$ ,  $W_\alpha$  – вес кандидата
 $L_\alpha$  – список агентов-кандидатов
procedure  $V(A)$ 
     $eof \leftarrow false$                                 -- Флаг завершения процедуры голосования
    for all  $\alpha \in A$  do                      -- Инициализация агентов
         $C_\alpha \leftarrow \alpha$ 
         $W_\alpha \leftarrow \dim(L_\alpha)$ 
    end for
    while not  $eof$  do                          -- Основной цикл голосования
        for all  $\alpha \in A$  do                  -- Цикл по всем агентам
             $G1(\alpha)$                          -- или  $G2(\alpha)$ 
        end for
        'Определение условий завершения процедуры голосования  $eof$ '
    end while

```

Такая процедура голосования сходится в практически значимом количестве экспериментов с различными топологиями статического роя, т.е. заканчивается выбором единственного агента – лидера, как в случае использования $G1$, так и в случае использования $G2$. В работе показывается конечность процесса переголосования для топологий сети агентов типа "цепь", "кольцо" и "прямоугольник". В общем случае оценка количества тактов, за которое все агенты проголосуют за одного кандидата, определяется выражением:

$$T(\rho, K) = \sum_{i=0}^Z \rho^i, Z = [\log_\rho K] \quad (12)$$

где K – количество агентов, ρ – среднее число соседей агента. Таким образом, время голосования слабо зависит от количества агентов K , а определяется топологией связей в рое.

Выбор лидера – это базовый элемент процесса организации в группе агентов. На основе процедуры голосования решается задача дифференциации функций членов группы. При отсутствии различий между агентами распределение ролей в статическом роe определяется исключительно текущей топологией системы. В работе рассматривается *метод распределения ролей (задач)*, основанный на известной процедуре распространения волны управления: каждый узел назначает роль своим ближайшим соседям, те – своим и т.д. Важно, что инициатором распространения является лидер. В качестве примера использования процедур выбора лидера и дифференциации функций рассматривалась задача стайной охоты. В ней лидер стаи назначает роли загонщикам для совершения маневра окружения жертвы.

Общение. Важнейшим аспектом социоподобного поведения является способность членов группы к общению, причем без использования языка, а на уровне сигнальной коммуникации. Предложенная в работе эмоционально-потребностная архитектура анимата позволяет описать эффекты обмена сигналами и связанные с ними механизмы поведения, такого, например, как контагиозное (заразное). Примером контагиозного поведения является действие сигнала тревоги, заставляющего всю группу обратиться в бегство. Агент генерирует сигнал, связанный со шлюзом с максимальной по модулю частной отрицательной эмоцией (шлюз – это элемент, определяющий соотношение между актуальной потребностью, состоянием сенсорной системы и выполняемым действием). Схема генерации и восприятия сигнала "Опасность" приведена на Рис. 5.

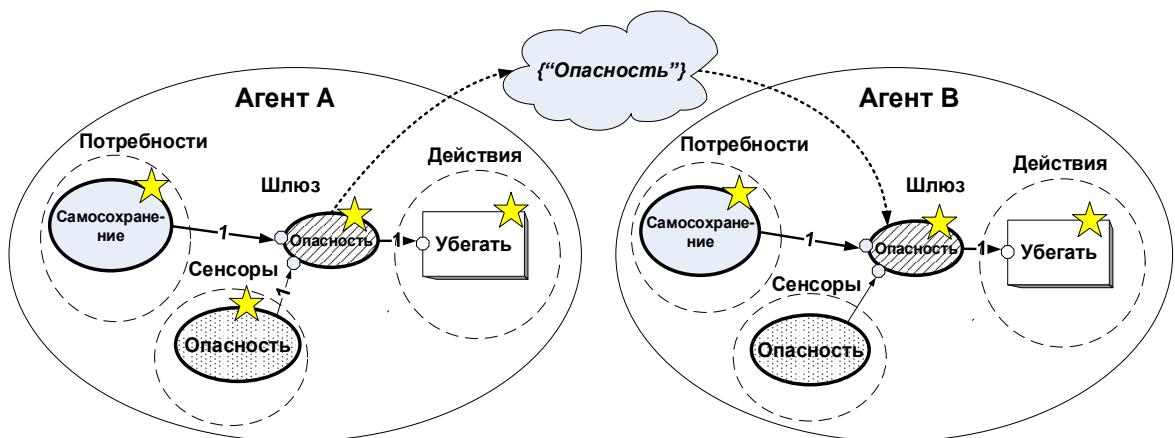


Рис. 5. Генерация и восприятие фразы

Здесь агент-инициатор **А** формирует сигнал "Опасность", который воспринимается агентом-реципиентом **В**. При этом у реципиента **В** шлюз "Опасность" возбуждается даже при отсутствии подтверждающего сигнала от

соответствующего сенсора. Далее реципиент B выполняет действие "Убегать". Формально это означает следующее. Согласно (8), активизация процедуры f зависит от значений сигналов шлюзовых элементов G , а значение G зависит от потребностей и сенсоров. В нашем же случае мы говорим об активизации G от внешнего сигнала-фразы $Signal$, и (6) расширяется до

$$G = G(E, N, S, Signal). \quad (13)$$

Итак, воспринимаемый агентом-реципиентом сигнал определяет сенсорно-потребностное состояние другого агента, возбуждая вентильный элемент реципиента, а инициатором сигнала является неудовлетворенная потребность агента.

Подражательное поведение. Одним из базовых компонентов социального взаимодействия является подражательное поведение. Оно заключается в том, что, исходя из непосредственного наблюдения за действиями других членов группы (конспецифик), формируются новые ассоциативные стимул-реактивные связи, т.е. формируются новые правила поведения. При этом делается сильное допущение, что наблюдению подлежит не только выполняемое конспецификом действие, но и то, на что направлено или чем определено это действие, т.е. стимул. Пусть поведение анимата включает продукцию вида $S_m \rightarrow R_m$, где S_m – стимул, R_m – реакция. В терминах семиотической модели S_m и R_m – компоненты "значение" соответствующих знаков. Активизация реакции требует наличия еще одного условия – определения принадлежности реакции субъекту, т.е. чувства "самости" или агентивности. Это означает наличие дополнительного компонента – элемента $Self: Я$. Реакция R_m может входить и в компонент "значение" знака $Self$, однако удобнее считать R_m отдельным знаком. Представим продукцию в виде:

$$\omega_{S,R} S_m \wedge \omega_{self,R} Self \rightarrow R_m. \quad (14)$$

Здесь $\omega_{i,j}$ – сила связи между элементами i и j , $0 \leq \omega_{i,j} \leq 1$. В данном случае – между наблюдаемым стимулом и реакцией и между вершиной $Я$ и реакцией R_m (т.е. насколько реакция R_m рассматривается как "своя"). Активность элемента $Self$ вызывается либо тем, что действие инициируется самим агентом, либо, как будет сказано далее, результатом наблюдения за конспецификом (представителем своей группы, т.е. своего, близкого) A' , т.е.

$$Self = I \vee Obs(A'). \quad (15)$$

где I – результат активации $Я$ (чувство самости), $Obs(A')$ – результат сопоставления конспецифика A' с $Я$ (определение вида "свой"). Будем полагать,

что активность элемента R_m , в свою очередь, определяет выполнение некоторого действия или каскада действий. Кроме того, действие сопровождается выдачей некоторого сигнала *Signal*, который позволяет конспецифику определить состояние текущего агента: $R_m \rightarrow Signal$.

Пусть стимул S_m является обобщенным понятием, определяемым конкретными значениями $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. Например, стимулом S_m для действия R_m "Транспортировка" может быть понятие "Еда", а α_i – это значения знаков конкретных видов съедобных объектов. Эти значения могут определяться как величины, характеризующие активность наблюдаемых признаков. В таком случае S_m определяется как

$$S_m = \omega_{\alpha 1, S} \alpha_1 \oplus \omega_{\alpha 2, S} \alpha_2 \oplus \dots$$

Здесь \oplus – нечеткая алгебраическая сумма, $\omega_{i,j}$ – числовая величина, определяющая силу ассоциативной связи между признаком i и знаком j . Будем считать, что приведенная стимул-реактивная схема подчиняется общему правилу формирования ассоциаций: между одновременно активными элементами системы возникает связь, величина которой зависит от степени активности этих элементов, величины уже имеющейся связи и т.п. Пусть в некоторый момент времени t имеется множество из K активных элементов $Q = \{q_i / q_i \neq 0\}, i=1..K$. Тогда между всеми парами элементов множества Q формируются связи, значения которых определяются как

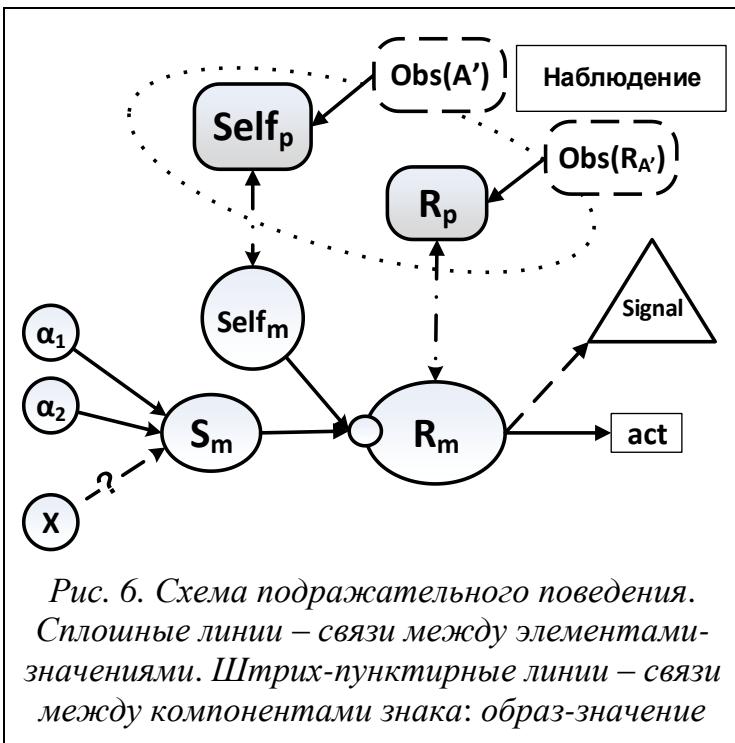
$$\omega_{i,j}(t) = \omega_{i,j}(t-1) \oplus \delta, q_i, q_j \in Q, 0 < \delta < 1, \omega_{i,j}(0) = 0. \quad (16)$$

$\omega_{i,j}$ могут трактоваться как коэффициенты уверенности, вероятности и пр., т.е. величины, характеризующие силу причинно-следственных связей, степень ассоциаций. Пусть далее анимат наблюдает, что конспецифик A' совершает некоторое действие R_m по отношению к объекту X . При этом X ранее не рассматривался субъектом, как определяющий фактор для стимула S_m (связь $X-S_m$ не входила в личный опыт субъекта). Наблюдение за действиями конспецифика приводит к активизации образа (перцепта) знака R_p . Наличие связи перцепт-значение означает активизацию элемента-значения $R_m: Obs(R_{A'}) \rightarrow R_p \rightarrow R_m$. Здесь $Obs(R_{A'})$ – результат наблюдения (распознавания) реакции или действий конспецифика A' . В то же время наблюдаемый конспецифик сопоставляется с \mathcal{Y} : активизируется перцепт $Self_p$, что приводит к активности $Self_m: Obs(A') \rightarrow Self_p \rightarrow Self_m$.

Таким образом, в возбужденном состоянии оказываются все компоненты схемы: R_m, S_m и собственно объект наблюдения X . Между X и S_m формируется

ассоциативная связь: $\omega_{X,S}(t) = \omega_{X,S}(t-1) \oplus \delta$.

Итак, в ходе наблюдения за поведением конспецифика объект X включается в поведенческий опыт анимата. Это и есть подражательное поведение. Рис. 6 иллюстрирует процесс: взаимодействие конспецифика с



объектом X приводит к появлению у агента-наблюдателя ассоциативной связи между X и знаком Стимул (S_m) в силу того, что при этом наблюдении возбуждаются знаки агента $Self$ и R_m . Помимо того, что знак $Self$ ($Я$) необходим для реализации свойства агентивности (принадлежности действия), он превращает модель мира анимата в картину мира, в которой присутствует знак "познающий (действующий) субъект".

Модель социального обучения. Суть социального обучения сводится к тому, что субъект может приобретать опыт (обучаться), наблюдая за реакциями и поведением членов своей группы. Среди множества видов социального обучения особый интерес представляют те, которые связаны с формированием условных рефлексов. Таких, например, которые наблюдаются в экспериментах с цыплятами, избегающими пищевых единиц характерного вида, если эта пища вызывала реакции отвращения у их сородичей. Когда конспецифик клюет бусину, покрытую жгучим веществом, происходит оценка результатов этого действия. В зависимости от результатов оценки изменяется величина связи между стимулом (бусина, s_i) и действием (клевание, a_j).

Введение явного компонента $Я$, а также компонента "Распознавание" позволяют описать процесс формирования такого же рефлекса и у наблюдателя. Это происходит из-за фактической замены сигнала $Я$ наблюдаемым образом. Наблюдение за аверсивной реакцией конспецифика в случае его отождествления с $Я$ приводит к активизации вершины "Оценка", которая, в свою очередь, изменит силу связи p_{ij} между стимулом i и действием j . Т.е. образуется аналогичный рефлекс и у наблюдателя. Условно схема

формирования нового рефлекса изображена на Рис. 7.

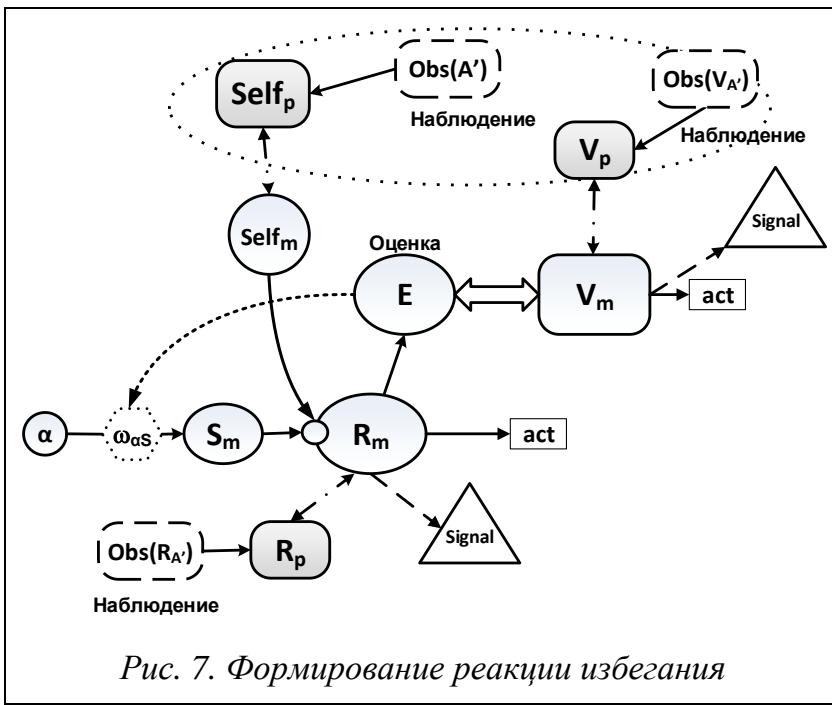


Рис. 7. Формирование реакции избегания

Формально для реализации процедуры социального обучения необходимо задать упорядоченную пятерку Se :

$$Se = \langle \mathcal{O}, \mathcal{P}, \mathcal{M}, \Omega, \mathcal{E} \rangle$$

где

\mathcal{O} – вектор результатов наблюдений: $\mathcal{O} = (Obs(A'), Obs(V_A'), Obs(R_A'))$,

\mathcal{P} – вектор перцептов знаков: $\mathcal{P} = (Self_p, V_p, R_p)$

\mathcal{M} – вектор значений знаков: $\mathcal{M} = (Self_m, V_m, R_m)$

Ω – матрица весовых коэффициентов, характеризующих связи между элементами знаковой системы.

Оценка действия \mathcal{E} определяется как функция от аверсивной реакции V и от некоторых внутренних механизмов оценки состояния анимата \mathcal{E}_{int} : $\mathcal{E} = f(V) \vee h(\mathcal{E}_{int})$. В простейшем случае $\mathcal{E} = \omega_{V\mathcal{E}} V \oplus \mathcal{E}_{int}$. Рассматриваемые элементы модели Se являются некоторой частью общей знаковой системы, из которой мы выбрали лишь те, которые имеют отношение к конкретному эффекту. В процессе обучения выполняется следующая процедура:

1. Определение активности элементов вектора \mathcal{P} : $\mathcal{P} = \Omega_{\mathcal{O}}^{\mathcal{P}} \mathcal{O}$, где $\Omega_{\mathcal{O}}^{\mathcal{P}}$ – подматрица Ω , описывающая связи между наблюдениями и перцептами.
2. Определение активности элементов вектора \mathcal{M} : $\mathcal{M} = \Omega_{\mathcal{P}}^{\mathcal{M}} \mathcal{P}$, где $\Omega_{\mathcal{P}}^{\mathcal{M}}$ – подматрица Ω , описывающая связи между перцептами и значениями.
3. Вычисление оценки \mathcal{E} : $\mathcal{E} = \omega_{V\mathcal{E}} V_m$.
4. Изменение весов связей между активными элементами, если $\mathcal{E} \neq 0$:

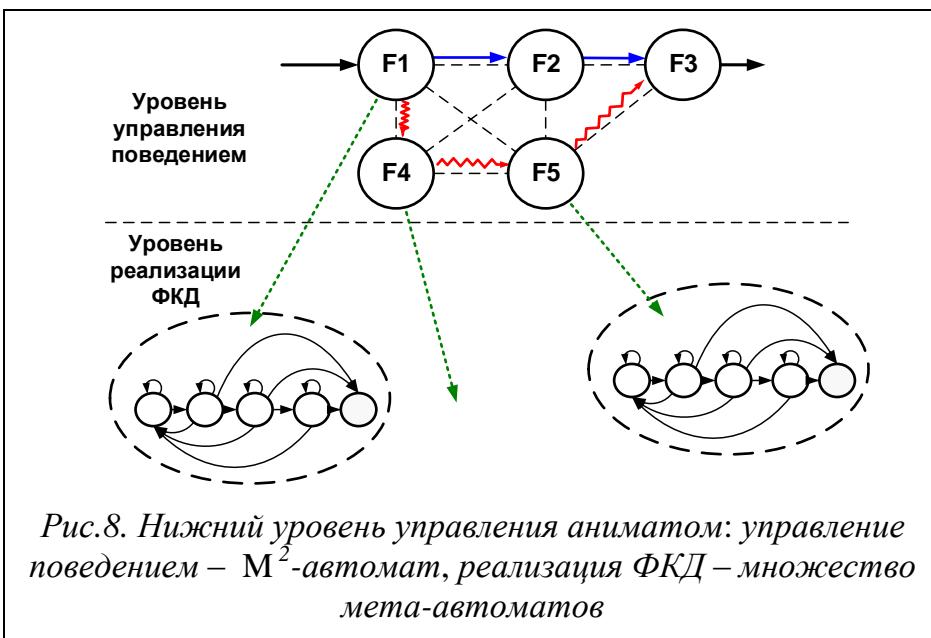
$$\omega_{ab}(t) = \omega_{ab}(t-1) \delta, a \in Q, b \in Q$$

Манипулирование индивидуальным поведением. В рамках парадигмы МСП поведение социума определяется особенностями характера индивидуального поведения. В работе рассмотрены три механизма манипулирования поведением анимата: (1) изменение характера поведения; (2) прямое выстраивание линий поведения и (3) переориентация реакций. Все они

базируются на особенностях эмоционально-потребностной архитектуры системы управления (СУ) анимата. Так, изменение характера поведения определялось изменением весов или значимостей потребностей анимата.

Прямое выстраивание реакций основано на изменении поведенческих траекторий, заданных множеством действий (или фиксированным комплексом действий – ФКД). Типовое высокоуровневое поведение анимата определяется последовательностями ФКД $B_i = (F_1^i, F_2^i, \dots, F_n^i)$. Здесь B_i – некоторая поведенческая последовательность, F_j^i – j -й ФКД, определяющий поведение i . Пусть требуется организовать последовательность ФКД $B' = (F_1, F_4, F_5, F_3)$. Механизм построения поведения B' заключается в изменении весов связей в переходах между состояниями.

Активация вершин F_i приводит к запуску соответствующего мета-автомата, реализующего свой ФКД (это – аналог выработки гормона у живых организмов). Это означает, что нижняя (базовая) часть системы управления анимата разделена на два уровня – уровень управления поведением и уровень реализации ФКД. При этом последовательности ФКД задаются M^2 -автоматами, а суть манипулирования здесь – это изменение структуры M^2 -автомата (изменение элементов матрицы переходов этого автомата). На Рис.8. представлена ситуация, когда структура M^2 -автомата, реализующего



последовательность ФКД $B = (F_1, F_2, F_3)$, меняется на $B' = (F_1, F_4, F_5, F_3)$.

Механизм переориентации реакций основан на изменении весов связей от оценочных вершин-элементов СУ. Это изменение может привести,

например, к следующему эффекту: то, что ранее считалось аниматом опасностью, будет оцениваться им далее как угроза. Различие между опасностью и угрозой определяется реакцией анимата: от опасности анимат убегает, а на угрозу реагирует агрессией.

Агрессия. Одним из базовых механизмов, формирующих социальное

поведение, является агрессивное поведение. В работе была предложена модель макроуровня, определяющая влияние агрессивности индивидов на эффективность решения задачи территориального распределения, а также исследовались эффекты, связанные с заданием явного компонента агрессивности. В последней модели условие агрессивного действия определяется эмоциональным состоянием анимата: $C_{aggr} = C_{aggr}(E)$, $E = \{E_i\}$. Здесь $i = 1..L$, L – количество совершаемых действий, а E характеризует эмоциональное состояние агента, зависящее от текущих потребностей. В свою очередь текущая склонность (аналог потребности) к агрессии является функцией от времени t , внутреннего состояния анимата C_{int} и состояния среды C_{env} :

$$N_{aggr} = N_{aggr}(t, C_{int}, C_{env}).$$

Центральный вопрос агрессивного поведения – выбор объекта агрессии. Автором было сделано предположение, что объектом O_{aggr} агрессии является тот объект, с которым связано действие R , характеризующееся максимальной по модулю отрицательной эмоцией: $O_{aggr} = \arg R_i$: $i = \arg \min E$. В итоге происходит активизация некоторой процедуры R_{aggr} , называемой проявлением агрессии, с параметром "цель агрессии" O_{aggr} :

$$C_{aggr}(E) \& N_{aggr}(t, C_{int}, C_{env}) \rightarrow R_{aggr}(O_{aggr}).$$

В работе использовались следующие реализации функций: $R_{aggr}(O_{aggr})$ – процедура разворота в сторону объекта агрессии O_{aggr} и принятие угрожающей позы (генерация некоторого сигнала, воспринимаемого окружающими); C_{aggr} – это пороговая функция $C_{aggr}(E) = \begin{cases} 1, & \sigma < \varepsilon \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$, где $\sigma = \sum_{i=1}^M E_i$, ε – некий порог; N_{aggr} зависит от времени t , эмоционального состояния E и удаленности от базы r (чем дальше от базы, тем меньше склонность к агрессии):

$$N_{aggr} = \delta_1(t)\delta_2(E)\delta_3(r) = [1 - e^{-t}][1 - e^{-E_{neg}}][e^{-r}].$$

$$\text{Здесь } E_{neg} = \frac{1 - \text{sign}(\sigma)}{2} \sigma.$$

В целом же был сделан следующий вывод: в силу отсутствия неких специфичных "агрессивных" подсистем (блоков, функциональных узлов) у живых организмов, более целесообразно и конструктивно рассматривать "агрессивность" лишь как некоторую внешнюю оценку тех или иных реакций анимата, которые необходимы для реализации ряда важных механизмов взаимодействия, прежде всего – доминирования.

Итак, совокупность предложенных моделей и механизмов позволяет создать группу искусственных агентов, обладающую всеми атрибутами

социального сообщества.

Четвертая глава посвящена применению разработанных подходов, моделей и алгоритмов к решению таких комплексных задач, как исследование территории, патрулирование и т.д. Для иллюстрации сути подхода МСП была рассмотрена показательная задача равномерного распределения аниматов по территории. Показано, что эта процедура распределения может быть сведена к оптимизационной задаче размещения агентов по индивидуальным кормовым участкам. Однако вместо прямого решения этой задачи предлагается поведенческая модель, включающая два важнейших компонента: механизм памяти и механизм разрешения конфликта (агрессивное поведение). Оказавшись на кормовом участке в момент времени t , анимат начинает циклический осмотр: регистрируется текущий угол поворота α_i и определяется код объекта (цвет ориентира) O_j , попавшего в поле зрения анимата. Таким образом, получается описание текущей сцены следующего вида: $Sc(t)=\{(\alpha_i, \{O_j\})\}, i=1..N_{step}, j=1..N_{det}$. Здесь N_{step} – количество шагов поворота, N_{det} – количество распознаваемых объектов. Итак, текущая сцена – это упорядоченный список из элементов O_j (разумеется, в общем случае сцена – это множество наблюдаемых объектов и отношений между ними, а здесь рассмотрен ее крайне упрощенный вариант). Память анимата представляет собой список зарегистрированных к моменту времени t сцен Sc_i с соответствующими весами ω_i : $M(t)=[(Sc_i, \omega_i)]$.

Сформировав текущую сцену, анимат сопоставляет ее со списком уже имеющихся. Если обнаруживается похожая сцена, то текущая сцена считается знакомой. Анимат в этом случае увеличивает значение соответствующего веса ω_i . Этот вес характеризует степень знакомства анимата с участком. Реализация процедуры сопоставления сцен сводится к результату пересечения компонентов двух сцен – текущей $Sc(t)$ и находящейся в списке Sc_i . Оказываясь на том или ином участке, анимат запоминает окружение (сцену), регистрируя при этом количество посещений этого участка (параметр ω_i). Процедура оценки ситуации заключается в том, что анимат сравнивает уровень своей агрессивности с уровнем агрессивности соперника – другого анимата, появившегося на участке. Если соперник более агрессивен, то анимат покидает участок. Уровень агрессивности определяется как $A(t)=k_1Age(t) + k_2\omega_i$. Здесь $Age(t)$ – возраст анимата, ω_i – вес текущей сцены (степень "знакомства" участка), k_1, k_2 – весовые коэффициенты. Полученное в ходе экспериментов распределение аниматов по кормовым участкам в зависимости от их возраста и

опыта качественно соответствовало тому, что наблюдается у насекомых.

Далее в работе был рассмотрен вопрос существования обобщенной задачи, к решению которой может быть сведен ряд практических задач ГР, таких как патрулирование, охрана территории, фуражировка и пр. Такой задачей, разрешающей проблему унификации моделей и методов и определяющей некий универсальный функциональный базис, основанный на механизмах социального поведения, является задача т.н. территориального гомеостаза.

Территориальный гомеостаз (ТГ) – это понятие, определяющее ряд специфических особенностей системы "группа роботов – среда". Основными проявлениями ТГ, обеспечивающего устойчивое функционирование группы агентов (роботов, аниматов) на ограниченной территории, являются: (1) наличие знаний о состоянии территории обитания (задача мониторинга); (2) способность агентов к поведению, связанному с обеспечением собственной безопасности; (3) способность агентов к поддержанию своей энергетической автономности; (4) распознавание опасных (представляющих угрозу) факторов и (5) способность группы агентов к активному противодействию угрозам. Основной целевой функцией группы агентов является поддержание ТГ как постоянства состава группы и территории. При этом такие типовые задачи групповой робототехники, как патрулирование, мониторинг, разведка и эскортирование рассматриваются как частные проявления этого более общего понятия, т.е. как интерпретация поведенческих компонентов.

После сведения механизмов, необходимых для решения задачи поддержания ТГ в единую схему, и выделения задач индивидуального и группового уровней, получается итоговый перечень поведенческих процедур, включающий распознавание ситуаций, координированное принятие решений, планирование и пр. На Рис. 9. представлена схема зависимостей между различными поведенческими феноменами и базовыми механизмами.

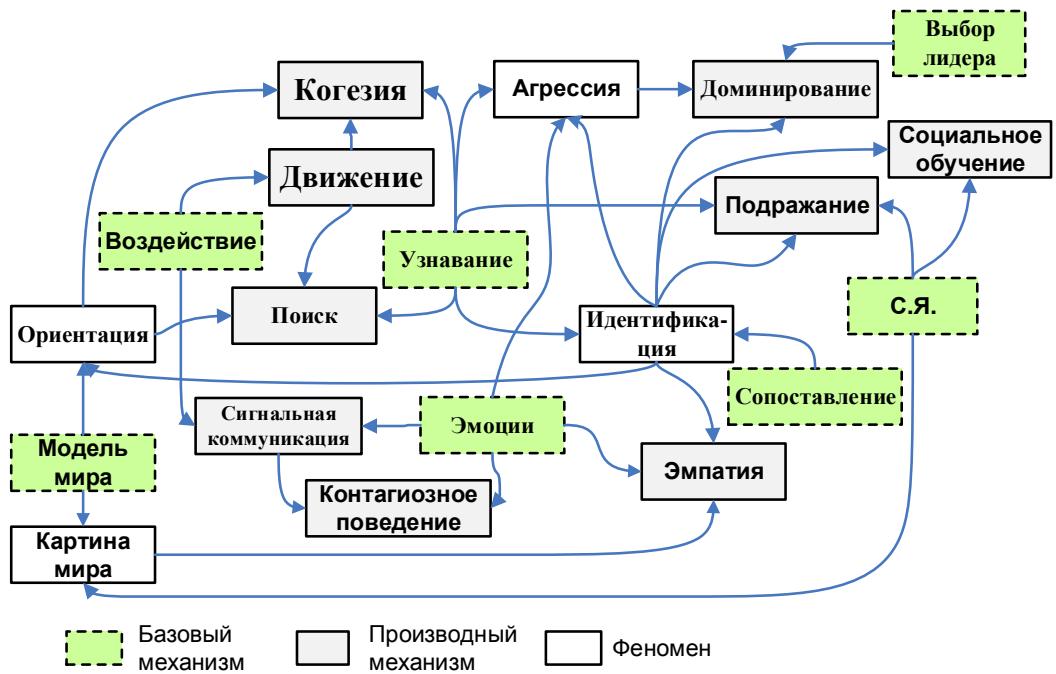


Рис. 9. Механизмы социоподобного поведения и их базис – элементы, не имеющие выходов (обозначены пунктиром) (С.Я. – субъективное Я)

Обобщенная поведенческая модель, носителем которой является некоторая знаковая сеть, включает следующие компоненты:

(1) Z – структура-носитель, конечное множество функциональных элементов Q и связей между ними. Ряд элементов множества Q интерпретируется следующим образом:

(2) N – множество потребностей, $N \subseteq Q$.

(3) S – элементы сенсорной системы, $S \subseteq Q$.

(4) A – множество поведенческих программ (ФКД), $A = \{A_i\}$, $A_i \subseteq Q$.

(5) M – память анимата, подмножество элементов структуры $M \subseteq Z$, среди которых выделяются носители представления образов M_{img} , имен этих образов M_{name} и пр.

(6) Эмоциональное состояние E : $E \subseteq Q$. Это – множество наблюдаемых элементов, участвующих в эмоциональной регуляции поведения агента.

(7) $W(t)$ – текущее состояние агента. Это – композиция состояний элементов Z потребностей, активности и эмоций в некоторый момент времени t : $W = W(N, A, E)$. Здесь важно, что в состояние агента не входят элементы сенсорной системы S .

(8) G – целевая функция агента (субъективный образ конечного результата), $G \subseteq Q$.

Цель поведения анимата заключается в удовлетворении его потребностей. В множестве Q выделяется некоторое подмножество элементов, которые

связаны с достижением потребностей: $G = Q_N \subseteq Q$. Таким образом, поведение анимата заключается в том, чтобы перевести элементы множества Q_N в определенные состояния Q_N^G . Введенные компоненты и понятия позволяют определить элементы и механизмы социоподобного поведения в функциональной форме (Табл. 5).

Табл. 5. Функциональное представление механизмов социоподобного поведения

Механизм	Описание
Базовые механизмы	
Воздействие*	$\Psi_{inf} = \Psi_{inf}(S, A)$
Узнавание	$\Psi_{rec} = \Psi_{rec}(S, M) \rightarrow M_{img},$ $M_{img} \subseteq M$
Сопоставление	$\Psi_{comp} = \Psi_{comp}(M_{img}) = M_{img} \times M_{img} \rightarrow M_{name}, M_{img}, M_{name} \subseteq M$
Я	$M_I = \Psi_I(M) = SignI \subseteq M$
Модель мира	$M_{wmod} \subseteq M$
Эмоции	$\Psi_{emo} = \Psi_{emo}(N, S, A, E) \rightarrow A \times E$
Выбор лидера*	$\Psi_{leader} = \Psi_{leader}(W) \rightarrow A$
Производные механизмы	
Движение*	$\Psi_{mov} = \Psi_{mov}(\Psi_{inf})$
Сигнальная коммуникация	$\Psi_{sc} = \Psi_{sc}(E, \Psi_{inf})$
Идентификация	$\Psi_{ident} = \Psi_{ident}(\Psi_{rec}, \Psi_{comp})$
Картина мира	$\Psi_{wp} = \Psi_{wpic}(\Psi_I, \Psi_{wmod})$
Контагиозное поведение	$\Psi_{cont} = \Psi_{cont}(\Psi_{sc}, \Psi_{emo})$
Агрессия	$\Psi_{aggr} = \Psi_{aggr}(\Psi_{inf}, \Psi_{ident}, \Psi_{emo}) \rightarrow A$
Социальное обучение	$\Psi_{ss} = \Psi_{ss}(\Psi_{ident}, M_I) \rightarrow A \times S$
Подражательное поведение	$\Psi_{ib} = \Psi_{ib}(\Psi_{rec}, \Psi_{ident}, M_I) \rightarrow A \times S$
Доминирование	$\Psi_{dom} = \Psi_{ib}(\Psi_{aggr}, \Psi_{ident}, \Psi_{leader}) \rightarrow A$

* – базовые механизмы, реализуемые "как есть", т.е. не рассматриваемые как отдельные модели

Именно эти базовые механизмы ложатся в основу математического и алгоритмического обеспечения при создании групповых робототехнических комплексов. Отметим еще раз: это – перечень механизмов, необходимых для создания социума, компоненты для решения обобщенной задачи – поддержания территориального гомеостаза, к которой сводится ряд практических задач ГР.

Управление социумом. Социум рассматривается как некое устойчивое, замкнутое образование, деятельность которого поддерживается комплексом законов и правил внутригруппового взаимодействия. Здесь под управлением

понимается изменение характера поведения сообщества. С точки зрения решения практических задач это означает, что для охраны территории требуется агрессия к чужакам и сильная когезия; для захвата территории (экспансии) – сильное доминирование, агрессия к чужакам, но слабая когезия; для функционирования в сложных (неблагоприятных) условиях – необходимость кооперации и высокая эмоциональная отзывчивость и т.д. В работе были рассмотрены три способа целенаправленного изменения поведения социума: (1) прямое воздействие на индивида (изменение параметров СУ); (2) оказание воздействия на окружающую среду (косвенное управление) и (3) управление склонностью к симпатии (распознавание "свой-чужой").

При этом понятие *устойчивости* группы рассматривается в работе с качественной точки зрения, основанной на модели когнитивных карт. В них положительные (порождающие неустойчивость) циклы превращаются в устойчивые путем введения дополнительных сущностей (факторов), которые и представляют собой те или иные механизмы и феномены социального взаимодействия.

Основным способом прямого воздействия на индивида является использование принципов манипулирования, изменяющего *характер* индивидуального поведения и, как следствие, характер поведения всего социума. В работе показано, что наиболее явный эффект изменения поведения социума наблюдается при оперировании такой характеристикой, как агрессивность.

В исследовании затрагивался вопрос об управлении социумом путем изменения параметров, отвечающих за проявления эффектов альтруизма/эгоизма. Было показано, что наличие *Я* как явного компонента семиотической модели мира агента, процедуры отождествления *Я* с другими агентами и механизма подражания, позволяет реализовать механизм эмпатии (отзывчивость на эмоциональные состояния окружающих). В работе описываются результаты моделирования группового поведения агентов, у которых способность к эмпатии рассматривалась с точки зрения адаптационного механизма: определялось оптимальное соотношение "альтруистов" и "эгоистов" в зависимости от пищевого богатства среды обитания, законы изменения параметра "симпатии", определяющего склонность к взаимопомощи и т.п.

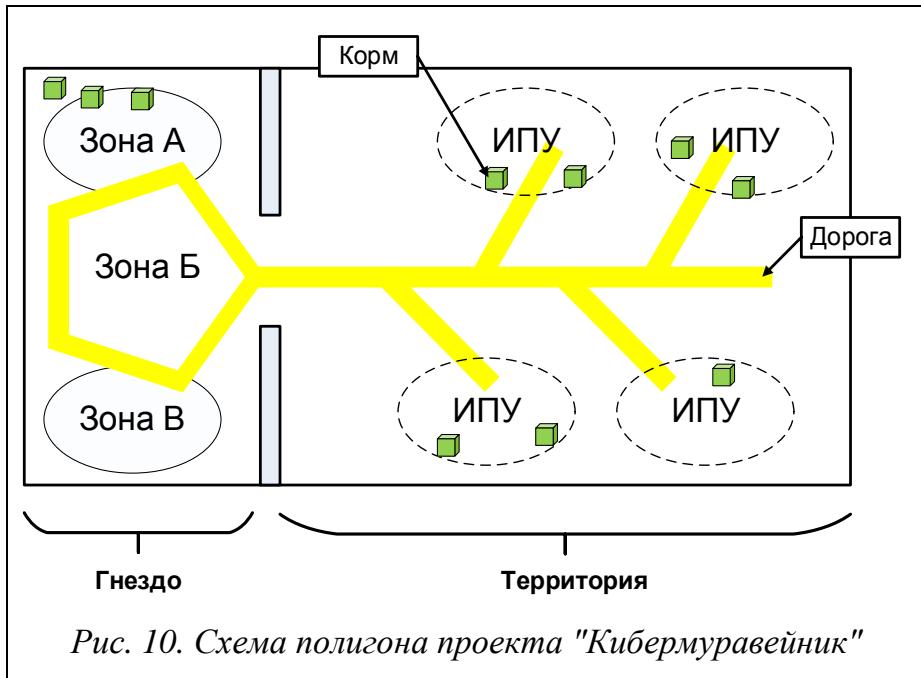
Пятая глава посвящена вопросам технической и модельной реализации решений практических задач. Апробация рассмотренных выше моделей и

алгоритмов проводилась не только на уровне имитационного моделирования, но и на реальных робототехнических системах. Основу экспериментального обеспечения составляли мобильные роботы серии *YARP*. Максимальная численность группы достигала 20 экземпляров.

Для проведения вычислительных экспериментов была создана специализированная система моделирования *KVORUM*. Система *KVORUM* предназначена для симуляции поведения больших групп агентов и представляет собой эмулятор роботов и среды их обитания. Особенностью системы является наличие интерфейсов, позволяющих управлять как виртуальными агентами, так и реальными техническими устройствами. *KVORUM* ориентирован на моделирование и отладку поведенческих процедур, представленных в автоматной форме. Описание робота включает в себя полный набор сенсоров, при этом механизмы перемещения в пространстве и взаимодействия робота со средой и другими агентами ограничены исключительно кинематическими и геометрическими моделями. Это позволяет производить быстрое моделирование поведения групп агентов.

Для экспериментальной отработки и апробации разработанных моделей и алгоритмов на некоторой показательной комплексной задаче был реализован проект "Кибермуравейник". Его основная задача заключалась в реализации комплексного группового поведения роботов, имитирующих пищевое поведение насекомых (из класса задач поддержания территориального гомеостаза).

Экспериментальный полигон состоял из двух частей – "гнезда" и прилегающей к нему территории. Гнездо разбито на три зоны – зону складирования добытой пищи *A*, зону, где собираются на выход агенты *B* и зону мобилизации *B*, где находятся не занятые сбором пищи агенты. На прилегающей территории пища располагается на т.н. индивидуальных поисковых участках (ИПУ), Рис. 10.



Реализация пищевого поведения складывалась из решения следующих подзадач: (1) индивидуальный поиск пищи; (2) групповая фуражировка (мобилизация); (3) стайная охота (реакция на "чужака") и (4) распределение

роботов по ИПУ. Общая архитектура комплекса представлена на Рис. 11.

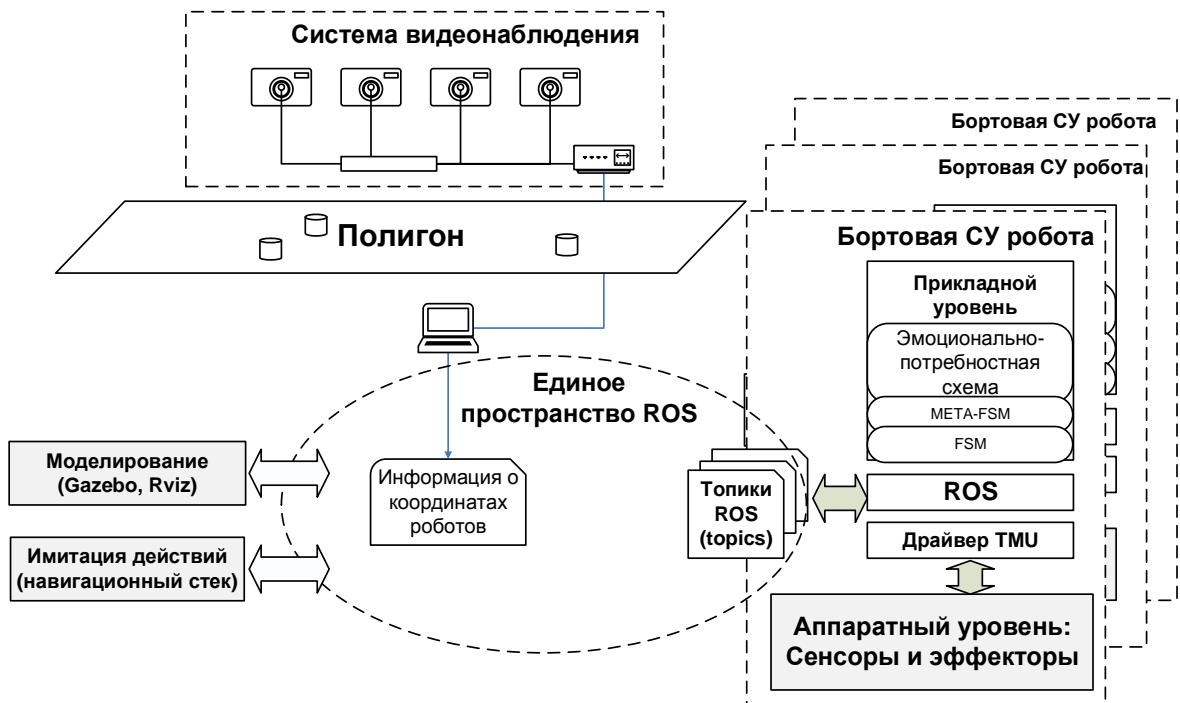
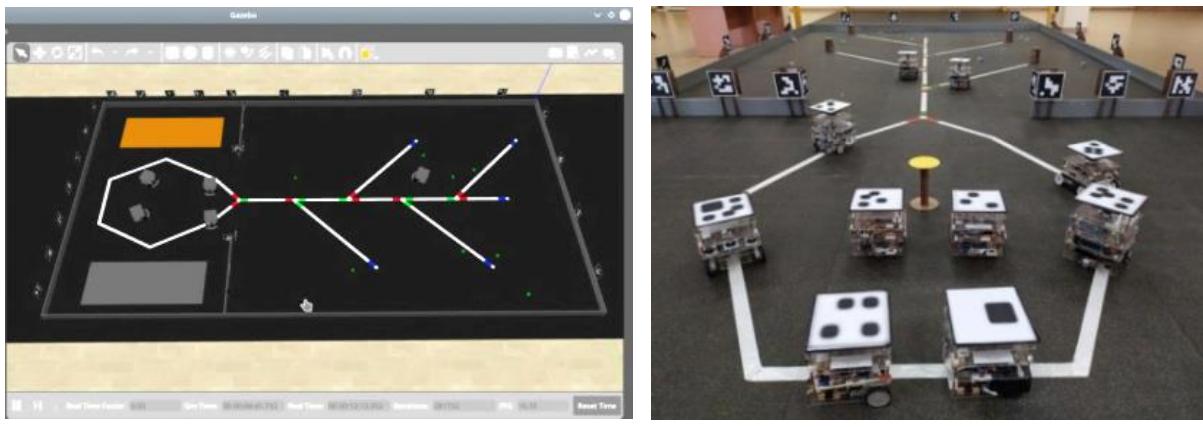


Рис. 11. Архитектура программно-аппаратного комплекса. ROS (Robot Operation System) – платформа для разработки программного обеспечения роботов, TMU – архитектура СУ робота, FSM – реализация управляющих автоматов, Gazebo, Rviz – средства моделирования

В целях унификации процедуры управления все прикладные действия, совершаемые роботами, имеют представление либо в виде мета-автомата, либо автоматной "обертки" системных процедур.

Изображения модельного и реального полигонов представлены на Рис. 12.



a)

б)

Рис. 12. а) Модель полигона в системе *Gazebo*, б) реальный полигон

Экспериментальная группа состояла из 6 роботов основного состава. Этого количества достаточно для адекватного моделирования процесса фуражировки, которое проходило в три стадии:

1. Моделирование в системе *KVORUM*.
2. Моделирование в среде *Gazebo*.
3. Физическое моделирование на реальном полигоне.

На *KVORUM*-моделях отрабатывались стратегии поведения: работа эмоционально-потребностной архитектуры, мета-автоматы, частично – сложные действия. Далее автоматы переносились в модель *Gazebo* – среду моделирования робототехнических систем. В *Gazebo* отрабатывались низкоуровневые механизмы и элементы поведения в условиях, приближенных к реальному. Финальным этапом являлась отработка и окончательная доводка моделей уже на реальной группе роботов. Такая трехуровневая система была необходима прежде всего для минимизации затрат ресурсов, требуемых для моделирования. Дело в том, что отношение модельного к физическому времени (*RTF – Real Time Factor*) в системе *KVORUM* достигало порядка 10, а в системе *Gazebo* величина *RTF* снижалась до 0.03. Если физическое время цикла фуражировки на реальном полигоне составляло порядка 15 минут, то в *Gazebo* на это уходило около 8 часов.

На базе разработанного программно-аппаратного комплекса был решен ряд таких задач как: (1) распределение роботов по участкам; (2) процедура мобилизации; (3) исследование территории (поисковое поведение).

(1) *Распределение роботов по индивидуальным участкам*. Теоретическая основа задачи – модель территориального распределения агентов. Базовый механизм управления – мета-автомат. Здесь речь идет о реализации сложной поведенческой процедуры, не требующей когнитивного уровня организации.

Были отработаны следующие основные технические задачи уровня действий:

1. Навигация по отмеченным дорогам (поиск, возвращение на дорогу, возвращение на базу).
2. Распознавание окружения (определение степени знакомства с участком).
3. Манипуляционные функции: захват и транспортировка "пищи" (кубиков).
4. Сигнальная коммуникация.

(2) *Мобилизация*. Постановка задачи заключается в том, что активный агент, найдя целевой объект, возвращается на базу (в гнездо) и активирует поисковые процедуры находящихся там пассивных фуражиров. Целевым объектом может быть не только пища, но и обнаруженный "чужой". Основная цель задачи мобилизации – отработка внешнего включения поведенческих процедур. Отрабатывались три режима мобилизации:

1. Адресная мобилизация – активация пассивных фуражиров с информированием о целевых индивидуальных поисковых участках.
2. Безадресная мобилизация – активация пассивных фуражиров без указания цели; она же – активизация защитной реакции.
3. Стайное поведение (следование за лидером).

На Рис. 13 показана обобщенная диаграмма фрагмента пищевого поведения. Целью *Goal* может быть как пища, так и "чужой". В случае обнаружения *Goal* агент оценивает найденный объект. Если *Goal* – это "чужой", то оценка является комплексной: она зависит от того, сколько "чужих" и "своих" рядом, насколько агент находится далеко от базы.

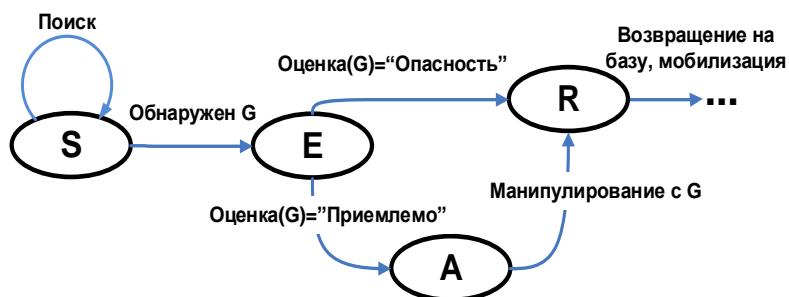


Рис. 13. Обобщенная диаграмма поискового поведения

Если *Goal* в итоге оценивается как опасность, то агент возвращается на базу, мобилизуя конспецификов. В противном случае (*Оценка* = "приемлемо") агент "нападает" на *Goal* (исход в виде изгнания *Goal* несущественен). Интенсивность мобилизации определяется количеством пищи или, если *Goal* – "чужой", близостью от базы. Этот механизм обеспечивает решение задачи равномерного покрытия территории или распределения агентов по кормовым участкам в зависимости от мощности источников и количества агентов.

(3) *Исследование территории (поисковое поведение)*. Решение задач распределения роботов по индивидуальным поисковым участкам (ИПУ) и реализации механизма мобилизации подразумевало, что аниматы знакомы с местностью. В частности, использовалась инфраструктура в виде "дорог" к ИПУ или информирование о месте интереса членов группы при мобилизации. Задача исследования территории была рассмотрена с точки зрения основной целевой функции – поиска ресурсов.

Траектории движения разведчиков могут быть представлены как случайные процессы. Если скорость постоянна, а меняется направление движения (угол α), то в общем случае в момент времени t ориентация агента определяется как $\alpha(t) = \alpha(t-1) + \xi(t)$, $\alpha(0) = \alpha_0$. Здесь α_0 – начальный угол ориентации агента, а $\xi(t)$ – случайная величина. Были рассмотрены три варианта определения траектории движения.

1. *Случайное блуждание*. В простейшем случае это стандартное броуновское движение, описываемое нормальным распределением

$$\xi(t) = \xi \sim N(\mu, \sigma^2), \mu=0, \sigma^2=1.$$

Если полагать, что начальное положение разведчиков фиксировано, то образуются достаточно устойчивые области исследования территории.

2. *Антикогезия*. Агенты стремятся не сближаться друг с другом, возникает взаимное отталкивание. В таком режиме территория исследуется более равномерно. В режиме избегания в описании случайной величины ξ матожидание μ становится варьируемым параметром, зависящим от расположения P других членов группы в момент времени t : $\mu(t) = \mu(P(t))$. Этот механизм реализуется автоматом, в котором имеются правила вида "*Если слева (справа) наблюдается конспецифик, то повернуть направо (налево)*". Очевидно, что стратегия случайного блуждания, даже с антикогезией, не приводит к формированию дорог – постоянных маршрутов к индивидуальным поисковым участкам.

3. *Формирование дорог*. Задача заключается в том, чтобы агенты смогли (а) сформировать постоянные маршруты – дороги к ИПУ, и (б) дороги покрывали бы исследуемую территорию равномерно. Равномерное покрытие реализуется с помощью механизма антикогезии. Формирование же постоянных дорог связано с реализацией механизма памяти, а именно: изначально аниматы начинают исследовать прилегающую территорию, постепенно запоминая ориентиры. Далее они начинают двигаться предпочтительно по знакомым местам, отходя

от гнезда все дальше. При нахождении пищи анимат возвращается в гнездо.

Маршрут движения $Route$ представим как последовательность (упорядоченное множество) пар (Sc_i, Act_i) , где Sc_i – описание наблюдаемого ориентира (объекта или группы объектов), Act_i – действие, совершающееся по отношению к Sc_i (обход Sc_i слева, справа или движение к Sc_i): $Route = \{(Sc_0, Act_0), (Sc_1, Act_1), \dots, (Sc_g, Act_g)\}$. Общий алгоритм поискового поведения выглядит так:

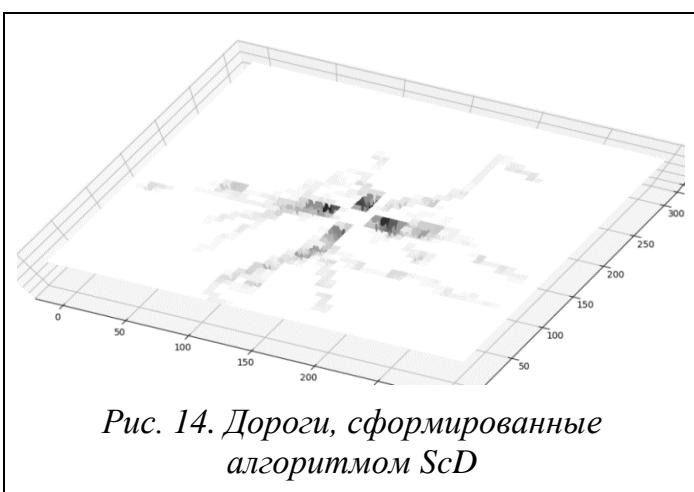
Алгоритм $ScOM$. Поисковая процедура с запоминанием маршрута

```

Дано: сохраненный в памяти маршрут Route (изначально Route пуст)
1. Определить направление движения (начало маршрута) (Sc0, Act0)
2. while не достигнуто состояние Scg do Отрабатывать маршрут endwhile
3. if найдена пища then Возвращение в гнездо
4. else:
5.   Включить процедуру случайного поиска (например, с антикогезией) PRS
6.   while не найдена пища do
7.     Определить наблюдаемые ориентиры Sci
8.     Сделать очередной шаг Acti процедуры PRS
9.     Запомнить: Route ← Route ∪ (Sci, Acti)
10.  endwhile
11.  Возвращение в гнездо
12. endif

```

В начале освоения территории маршрут $Route$ пуст, поэтому сначала выполняется процедура случайного блуждания. Алгоритм $ScOM$ повторяется циклически, обеспечивая постепенное освоение территории. В работе представлен один из механизмов запоминания маршрута движения – модель пространственной памяти анимата. В основе модели – формирование ассоциативных связей между множеством наблюдаемых ориентиров и совершаемых аниматом действий.



Альтернативным вариантом является стратегия, основанная на запоминании направления движения, при которой отправная точка является глобальным ориентиром. Тогда исследование территории заключается в том, что сначала задается случайный поиск до тех пор, пока не будет найдена пища, а запоминанию подлежит лишь обратная дорога. В работе представлен алгоритм поиска ScD , основанный на запоминании обратной дороги по направлениям движения. На Рис. 14 показан "рельеф" территории для случая работы этого алгоритма. Здесь видны явно

лишь обратная дорога. В работе представлен алгоритм поиска ScD , основанный на запоминании обратной дороги по направлениям движения. На Рис. 14 показан "рельеф" территории для случая работы этого алгоритма. Здесь видны явно

выраженные дороги – локализованные маршруты к ИПУ: чем чаще проходит анимат, тем темнее область.

В заключении обобщаются основные результаты диссертационной работы, обсуждаются проблемы и перспективы развития данного направления исследований.

Важно, что в ходе исследований показаны: а) работоспособность предложенных моделей на реальных технических устройствах и б) универсализм предлагаемых решений.

Очевидно, что любая из рассмотренных в работе задач может быть решена своим особенным, специальным способом (алгоритмом, методом), причем решена оптимально. Суть же предлагаемого подхода заключается в том, что вместо создания множества решений для каждой из возможных задач, предлагается единый базовый набор методов. Платой за универсализм (простоту, естественность) всегда является неоптимальность. Критерием успеха экспериментов является именно продемонстрированная возможность решения комплексной задачи – территориального гомеостаза. Основной синергетический эффект проявляется в способах решения этой задачи: формирование функциональной неоднородности в группе агентов, распределение задач, совместная деятельность и прочие феномены взаимодействия реализуются в группе локально взаимодействующих агентов с ограниченными когнитивными способностями, опираясь исключительно и только на набор базовых механизмов социального взаимодействия.

В приложениях приведены дополнительные материалы по теме исследования, а также акты внедрения результатов исследований.

Основной научный результат диссертации заключается в разработке и реализации нового подхода к построению систем групповой робототехники, функционирующих в сложных, динамических средах. Этот подход основан на создании моделей, методов и алгоритмов, реализующих элементы социоподобного поведения и позволяющих создавать самоорганизующиеся, надежные робототехнические системы – социумы роботов. При этом модели социального взаимодействия рассматриваются как адаптивные механизмы. Разработанный подход к организации группового управления имеет потенциально важное практическое значение. Использование парадигмы создания социумов технических устройств позволяет формировать качественно новые технические системы с расширенными адаптивными возможностями и широкой сферой применения.

В ходе проведенных исследований по теме диссертационной работы получены следующие **новые результаты**:

1. Показано, что получение ожидаемых системных эффектов возможно на базе новой методологии построения распределенных робототехнических систем, основанной на реализации моделей социоподобного поведения и построении социумов искусственных агентов.
 2. Разработана трехуровневая архитектура системы управления агентов (роботов), способных к социоподобному поведению; в основе архитектуры – исполнительный, эмоционально-потребностный и когнитивный компоненты, определяющие феномены индивидуального поведения и группового взаимодействия.
 3. Создан набор моделей и алгоритмов, реализующих базисные механизмы социоподобного взаимодействия: функциональная дифференциация, определение доминанта, когезия, контагиозное и подражательное поведение, социальное обучение и пр. Показано, что к этому базису сводятся все наблюдаемые феномены социального взаимодействия.
 4. Разработаны методы управления поведением социума искусственных агентов (роботов), основанные на манипулировании индивидуальным поведением. Изменение характера поведения группы роботов позволяет, используя неизменный набор механизмов социоподобного взаимодействия, решать широкий спектр задач группового управления: патрулирование, охрана и мониторинг территории, разведка и т.п.
 5. Создан ряд моделей и алгоритмов, обеспечивающих решение задач прикладного уровня: модель статического роя, алгоритмы выбора лидера в однородной группе, модель ассоциативной памяти анимата.
 6. Создана специализированная многоагентная система имитационного моделирования *KVORUM*, предназначенная для отработки моделей поведения и механизмов межагентного взаимодействия в больших группах агентов. Архитектура системы делает "прозрачным" перенос моделей поведения с имитационного уровня на уровень реальных робототехнических систем.
- Работоспособность и эффективность разработанных методов и алгоритмов подтверждены результатами имитационного моделирования, экспериментами на реальных группах мобильных роботов, а также опытом создания на их базе систем управления мехатронными комплексами.

Основные публикации по теме диссертации

Монография

1. Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. М.: УРСС, 2019. 352 с.

В изданиях из списка ВАК РФ

2. Карпов В.Э., Королева М.Н. К вопросу о формализации этики поведения коллаборативного робота // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2022. № 4 (28). С. 223-233.
3. Карпов В.Э., Сорокоумов П.С. К вопросу о моральных аспектах адаптивного поведения искусственных агентов // Искусственные общества, 2021. 16(2).
4. Karpov V.E. Can a robot be a moral agent? // In Artificial Intelligence. RCAI 2020. Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 2020. Vol. 12412. Pp. 61–70. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59535-7_5 (Scopus)
5. Карпов В.Э. Социальные сообщества роботов: от реактивных к когнитивным агентам // Мягкие измерения и вычисления, 2019. 15(2). С. 61-77.
6. Карпов В.Э., Ровбо М.А., Овсянникова Е.Е. Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум // Программные продукты и системы, 2018. Т. 31. № 3. С. 581-590. (RSCI)
7. Карпова И.П., Карпов В.Э. Агрессия в мире аниматов, или о некоторых механизмах управления агрессивным поведением в групповой робототехнике // Управление большими системами, 2018. Т. 76. С. 173-218. (RSCI)
8. Karpov V. The parasitic manipulation of an animat's behavior // Biologically Inspired Cognitive Architectures, 2017. Vol. 21. Pp. 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.bica.2017.05.002> (Wos/Scopus)
9. Карпов В.Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами, 2016. № 59. С. 165-232. (RSCI)
10. Karpov V., Migalev A., Moscovsky A., Rovbo M., Vorobiev V. Multi-robot Exploration and Mapping Based on the Subdefinite Models // In International Conference on Interactive Collaborative Robotics (ICR 2016). Lecture Notes in Artificial Intelligence (LNAI), 2016. Vol. 9812. Pp. 143–152. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43955-6_18 (Scopus).
11. Karpov V.E. A Sign-Oriented Mobile Robot-Control System // Scientific and Technical Information Processing, 2016. Vol. 43, Iss. 5-6. Pp. 281-288. <https://doi.org/10.3103/S0147688216050014> (Карпов В.Э. Об одной реализации знак-ориентированной системы управления мобильного робота // Искусственный интеллект и принятие решений, 2015. Т.3. С. 53-61). (WoS/Scopus)
12. Karpov V., Karpova I. Leader election algorithms for static swarms //

Biologically Inspired Cognitive Architectures, 2015. Vol. 12. Pp. 54-64. [https://doi.org/10.1016/j.bica.2015.04.001 \(WoS/Scopus\)](https://doi.org/10.1016/j.bica.2015.04.001)

13. Karpov V. Robot's temperament // Biologically Inspired Cognitive Architectures, 2014. Vol. 7. Pp. 76-86. [https://doi.org/10.1016/j.bica.2013.11.004 \(WoS/Scopus\)](https://doi.org/10.1016/j.bica.2013.11.004)

14. Karpov V.E. Emotions and Temperament of Robots: Behavioral Aspects // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2014. Vol. 53, Iss. 5. Pp. 743-760. <https://doi.org/10.1134/S1064230714050098> (Карпов В.Э. Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты // Известия РАН. Теория и системы управления, 2014. № 5. С. 126-145). (WoS/Scopus)

15. Karpov V.E., Valtsev V.B. Dynamic Planning of Robot Behavior Based on an "Intellectual" Neuron Network // Scientific and Technical Information Processing, 2011. Vol. 38, Iss. 5. Pp. 344-354. [https://doi.org/10.3103/S0147688211050054 \(WoS/Scopus\)](https://doi.org/10.3103/S0147688211050054)

16. Karpov V., Sorokoumov P. Application of Moral Norms in Behavior Modelling of Artificial Agents // Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing: Selected Contributions to the 10th International Conference on Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence (IMSC-2021). Kolomna, 2021. Pp. 194-200. [http://ceur-ws.org/Vol-2965/paper25.pdf \(Scopus\)](http://ceur-ws.org/Vol-2965/paper25.pdf)

17. Karpova I., Karpov V. Some Mechanisms for Managing Aggressive Behavior in Group Robotics // Annals of DAAAM and Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2018. Vol. 29, Iss. 1. Pp. 0566-0573. [http://dx.doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.082 \(Scopus\)](http://dx.doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.082).

18. Karpov V.E., Tarassov V.B. Synergetic Artificial Intelligence and Social Robotics // Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018. Vol. 679. Pp. 3-15. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-68321-8_1 \(WoS/Scopus\)](https://doi.org/10.1007/978-3-319-68321-8_1)

19. Karpov V.E., Karpova I.P. Formation of Control Structures in Static Swarms // Procedia Engineering, 2015. Vol. 100. Pp. 1459-1468. [https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.517 \(WoS/Scopus\)](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.517).

В сборниках трудов конференций

20. Карпов В.Э., Сорокоумов П.С. Нормы морали как адаптивный механизм для социума искусственных агентов // XIII международная конференция «Теоретическая и прикладная этика: Традиции и перспективы». СПб.: СПбГУ, 18-20 ноября 2021 г. С. 208-209.

21. Карпов В.Э. От подражательного поведения к эмпатии в социуме роботов. // Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019, 22-24 мая 2019, Санкт-Петербург): Труды семинара. Переславль-Залесский: Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2019. С. 238-247.

22. Карпов В.Э. Моральные отношения между искусственным агентами // XI международная конференция «Теоретическая и прикладная этика: Традиции и перспективы – 2019». СПб.: СПбГУ, 21-23 ноября 2019 г. С. 170-171.

23. Карпов В.Э. От роевой робототехники к социуму роботов // «Состояние и направления развития искусственного интеллекта – 2018», ФГАУ КВЦ «Патриот», 14-15 марта 2018. С. 122-130.
24. Карпов В.Э. Биологически инспирированные подходы в робототехнике // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22-23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия): Труды семинара. – М: Изд-во «Перо», 2016. – 184 с. С. 7.
25. Карпов В.Э. Сенсорная модель подражательного поведения роботов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем – Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2016): Материалы VI международной научно-технической конференции, Минск: БГУИР. С. 471-476.
26. Карпов В.Э. Знак-ориентированный механизм локального взаимодействия между роботами // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-технической конференции (18-20 мая 2015 г., Коломна). В 2-х томах. Т.2. М.: Физматлит, 2015. С. 504-514.
27. Карпов В.Э. Процедура голосования в однородных коллективах роботов. // XIV национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2014 (23-27 сентября 2014 г., Казань). Т.2. Казань: Издательство РИЦ «Школа», 2014. С. 159-167.
28. Карпов В.Э. Управление в статических роях. Постановка задачи // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 20-22 мая 2013). Т. 2. М.: Физматлит, 2013. С. 730-739.
29. Карпов В.Э. Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород): Труды конференции в 4-х томах. Т.3. Изд-во БГТУ, 2012. С. 275-283.
30. Карпов В.Э. Об одном механизме реконструкции сцен // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VI-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 16-19 мая 2011). В 2-х томах. Т.1. М.: Физматлит, 2011. С. 407-415.
31. Карпов В.Э. Коллективное поведение роботов. Желаемое и действительное // Современная мехатроника. Сб. научн. трудов Всероссийской научной школы (22-23 сентября 2011, Орехово-Зуево). С. 35-51.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. Карпов В.Э. Программа для моделирования поведения реактивных агентов / Программа для ЭВМ, №2019665029, 18.11.2019
2. Карпов В.Э., Сорокоумов П.С. Программа моделирования эмпатического взаимодействия в коллективе агентов с эмоционально-потребностной архитектурой / Программа для ЭВМ, №2022610287, 11.01.2022
3. Воробьёв В.В., Карпов В.Э., Наседкин А.С., Ровбо М.А. Программа управления группой подводных роботов на основе биологических моделей поведения / Программа для ЭВМ №2022661337, 20.06.2022.