

Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Часть 1.

Качественная среда функционирования. Основные определения и постановка задачи¹

А.А. Кулинич

Аннотация. В работе рассмотрена математическая модель формирования и функционирования команды искусственных интеллектуальных агентов с BDI архитектурой в качественной семиотической (знаковой) среде функционирования. В качестве основы математической модели среды функционирования выбрана модель многоагентной динамической системы «Группа роботов-Среда». Предложен метод структуризации среды функционирования в виде частично упорядоченного множества вложенных подпространств пространства состояний динамической системы и метод символизации классов состояний именами-символами, определяющие эти классы. Такая структура определена как качественный концептуальный каркас среды и названа семиотической средой функционирования. В терминах качественной семиотической среды функционирования предложена математическая модель интеллектуального агента с BDI-архитектурой, а также сформулированы условия образования и функционирования команд интеллектуальных агентов в этой среде.

Ключевые слова: *многоагентная система, агент, среда функционирования, качественная семиотическая среда.*

Введение

Идеология командной работы позволяет с помощью множества агентов (людей с разной квалификацией и способностями), или множества несложных технических устройств (роботов), выполнять сложные задания в результате кооперации их возможностей. Однако, создание команд агентов, способных решать сложные задачи в целом нетривиально.

В социальной психологии образование команды изучается в рамках теории малых групп. Объект исследования – команда как объединение людей, достаточно сложен, характеризуется неопределенностями, включает субъектов, поведение которых не всегда регламентируется некоторыми нормами. Естественно, что в процессах формирования и функционирования команды людей необходимо учитывать не только рациональность поведения членов команды, но и иррациональность их поведения. Считается, что каждая команда является группой людей, но не каждая группа является командой. Термин команда употребляют в тех случаях, когда

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 16-11-00018).

необходимо подчеркнуть взаимосвязанность и взаимозависимость членов группы, профессионализм которых позволяет достигать результатов, превышающих результат каждого из них в отдельности. В любом случае команда как социально-психологический феномен, трудно формализуемый объект исследования.

Теоретические и практические вопросы создания команд технических устройств (роботов), программных систем привлекают внимание специалистов в области теории управления, искусственного интеллекта и др. Так в работе [1] вопросы создания команд роботов ставится как задача группового управления. Рассмотрены два подхода к выработке группового управления: централизованный и децентрализованный. При децентрализованном управлении роботы обладают автономностью, способны обмениваться информацией и координировать свои действия для достижения личных целей и общей цели. Это позволяет получить свойства независимости команды агентов от центра, что повышает ее устойчивость к его отказам и отказам отдельных агентов.

Дальнейшее повышение автономности роботов (агентов) связано с повышением их интеллектуальности. Интеллектуального агента можно определить перечислением его свойств (способностей) [2]. Это: 1) *Автономность* – способность действовать самостоятельно; 2) *Реактивность* – способность реагировать на изменение состояния среды функционирования; 3) *Проактивность* – способность проявлять инициативу для достижения поставленных целей; 4) *Социальность* – способность взаимодействовать с другими агентами для достижения поставленной цели.

Первые два свойства (способностей) в программных и технических системах реализуются, как правило, достаточно просто, но третье и четвертое свойства, которые, по сути, определяют группу агентов как команду, требует исследований, которые могут опираться как на социально-психологические исследования малых групп, так и на математические модели команд в организациях, приведенных, например, в работе [3].

Для реализации всех свойств интеллектуальных агентов исследовались различные абстрактные архитектуры интеллектуальных агентов. Под архитектурой агента понимается множество функциональных подсистем, взаимодействие которых между собой и со средой функционирования позволяет реализовать свойства (1-4) интеллектуальных агентов. Одна из таких архитектур BDI (*Belief-Desire-Intention*) архитектура – это ментальная архитектура агента. В рамках этой архитектуры выделены три составляющие интеллектуального агента: убеждения (*Belief*), желания (*Desire*) и намерения (*Intention*). *Убеждения* характеризуют знания агента о предметной области, *желания* отражают цели агентов, а *намерения* - возможные

действия агентов для достижения поставленных целей. Каждая составляющая у абстрактного агента индивидуальна, может меняться по мере накопления агентом опыта работы в некоторой среде и характеризует в любой момент времени его ментальное состояние.

В формальной модели агента в терминах BDI архитектуры в работе [4] рассмотрены синтаксический и семантический аспекты языков описаний ментальных понятий этой архитектуры. Для описания синтаксиса может быть использован язык описания, основанных например, на логике предикатов первого порядка, а его семантическая модель в виде модели семантики возможных миров С. Крипке [5]. В модели семантики возможных миров, возможные миры убеждений, желаний и намерений связаны условиями достижимости, при этом с каждым миром ассоциируется своя теория (факты истинные в этом мире). В работах [6] приводится формальная модель агента основанного на многомодальной логике ветвящегося времени и семантике возможных миров. В рамках BDI архитектуры были предложены формальные модели реактивного, обучающегося, логического, целенаправленного и др. абстрактных агентов, в которых показана связь ментальных состояний агента и его поведения.

Задача создания команды на множестве агентов с BDI архитектурой заключается в том, чтобы организовать между агентами обмен информацией об их ментальных состояниях, создающий мотивации для их совместной работы для достижения как индивидуальных, так и общей цели. Фактически речь идет о самоорганизации агентов в динамическом процессе, основанном на обменах агентами информацией об их ментальных состояниях, для достижения агентами общей цели без внешнего вмешательства.

Вопросы командного поведения интеллектуальных агентов с BDI архитектурой исследовались в работе [7]. В этих исследованиях вводятся достаточно абстрактные принципы (спецификации) организации совместной работы группы агентов на основе общих намерений агентов. Общие намерения в группе агентов выражаются через обязательства агентов, принимаемых агентами при их совместной работе. В теории общих планов [8] основными базовыми понятиями являются понятия группового плана. Для выполнения группового плана агенты должны прийти к соглашению о действиях, которые они будут выполнять, реализуя групповой план.

Во многих случаях для моделирования командной работы оказывается достаточным использование агентов с простой реактивной архитектурой (стимул-реакция). Агент с реактивной архитектурой реагирует некоторым действием на любое изменение среды, в которой он находится. Интерес к моделированию коллективного поведения простых реактивных агентов появился в 60-е годы прошлого столетия. Так, в работах [9, 10, 11] на

основе изучения коллективного поведения конечных автоматов были заложены теоретические основы коллективного взаимодействия агентов. С помощью реактивных агентов реализуется, как правило, несложное командное поведение агентов – это образование стаи или роя агентов, определение лидера в группе, которое реализуется с помощью роевых алгоритмов [12]. Исследуются разнообразные алгоритмы обхода стай (роем) агентов препятствий, уклонение от столкновения [13] и т.д.

Теоретическая основа образования команд (коалиций) агентов была заложена в рамках теории кооперативных игр [14]. Здесь задача решается при условии рациональности агентов и полной информированности всех агентов о целях, ресурсах и стратегиях других агентов, а также при условии возможности дележа выигрыша, полученного коалицией агентов. Существуют методы решения кооперативных игр (С-ядро, МН-решения и др.) [14]. Однако при обеспечении полной информированности агентов эти методы имеют экспоненциальную сложность вычислений и коммуникаций между агентами относительно их числа, что ограничивает возможность их практического применения [15].

Еще одна группа методов – это методы, основанные на моделировании поведения агентов при образовании коалиций на основе теорий социального выбора и социальной зависимости субъектов [16, 17]. Эти методы позволяют оперативно решать вопросы образования открытых динамических коалиций, состав которых может меняться в процессе решения задачи, а агенты могут свободно входить в состав коалиции или выходить из нее [16, 17]. К недостаткам этого подхода относят отсутствие стимула у агентов для кооперации [18]. Это связано с отсутствием общей цели или отсутствием знаний у агентов о зависимости между их целями.

Все перечисленные работы создали теоретический фундамент командного поведения искусственных интеллектуальных агентов, который, в свою очередь, создал условия для появления различных ассоциаций интеллектуальных агентов, например, Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) или Object Management Group (OMG), которые разработали и стандартизировали языки и протоколы представления знаний и обмена информацией. Например, язык и протокол для обмена информацией и знаниями KQML, языки представления и обмена знаниями KIF, RDF, OWL и др., язык коммуникации агентов ACL – FIPA. Разработано множество программных сред для разработки и исследования многоагентных систем, например, JADE (Java Agent Development Framework), LEAP (EU - project), BlueJade (HP), FIPA-OS (Nortel -Emorpha), MicroFIPA-OS (HY) и др.

Таким образом, был создан теоретический и инструментальный базис для разработки многоагентных систем, решающих определенные групповые задачи. Несмотря на это

множество концептуальных вопросов, связанных с организацией командного поведения BDI-агентов, например, в условиях неопределенности требуют дополнительных исследований.

1. Постановка задачи

У каждого агента с BDI архитектурой возможна индивидуальная модель мира, которая, во-первых, определяет поведение самого агента, а во-вторых, может меняться по мере накопления агентом опыта. При этом элементы этой архитектуры – убеждения, цели и действия обычно выражаются не в числовом, а в символьном виде. По сути, это формальное описание знаний о предметной области, возможные значения которых задаются сложными структурами, элементами которых являются множества понятий, их признаки, значения признаков и множество отношений на всех этих множествах.

Такое формальное описание знаний агента – это работа разработчика на этапе проектирования агентов, и, несмотря на то что, в настоящее время существует языки описания знаний агентов (онтологий), эта работа достаточно трудоемка, особенно при моделировании кооперативной работы больших групп неоднородных интеллектуальных агентов.

В этих случаях, идеальным вариантом, был бы вариант самостоятельного построения агентами своих моделей знаний о предметной области, на основе опыта работы в этой области и некоторых базовых принципов построения модели знаний, представленных в их когнитивной архитектуре, например, в виде метаонтологии (самых общих знаний, правил, методов и т.д.). В настоящее время методы автоматического построения онтологий, как правило, основаны на анализе текста, и достаточно затратные с вычислительной точки зрения. Причем, говорить о высоком качестве, автоматически построенных онтологий не приходится. В этом случае, интерес могут представлять качественные онтологии - концептуальные каркасы предметной области, грубо описывающие понятийную структуру предметной области, построение которых не вызывает трудностей [19]. Применение грубых концептуальных каркасов предметной области в качестве модели знаний интеллектуального агента позволяет решать исследовательские задачи изучения: принципов организации команд агентов, различных аспектов поведения отдельных агентов и практические задачи.

Для моделирования и исследования кооперативной работы BDI-агентов будем рассматривать системную динамическую модель многоагентной системы [1]. В этой модели есть группа роботов R_i , $i=1, \dots, N$, каждый из которых характеризуется вектором состояний $R_i=(r_{i1}, \dots, r_{in})$ (вектором значений его характеристик) помещен в среду E , которая также характеризуется вектором состояния, $E=(e_1, \dots, e_n)$. Пара векторов $S=\langle R, E \rangle$ характеризует состояние системы «группа роботов – среда». Каждый робот может выполнять действия A ,

изменяющие собственное состояние или состояние других роботов и, следовательно, состояние системы «группа роботов – среда». Непредвиденные изменения среды характеризуются вектором $g(t)$. Действия роботов направлены на то, чтобы перевести текущее состояние системы S_c в некоторое желаемое состояние S_c^f . Изменение состояния системы «группа роботов – среда», как результата совместных действий роботов описывается системой дифференциальных уравнений. Ставится задача определения совместных действий роботов, позволяющих достичь поставленной цели S_c^f . Оценка действий всех роботов для достижения цели осуществляется с помощью оценочного функционала (1).

$$Y_c = \Phi(S_c^f, t_f) + \int_{t_c}^{t_f} F(S_c(t), A_c(t), g(t), t) dt \quad (1)$$

В выражении (1) первое слагаемое характеризует полезность целевого состояния, а второе качество группового управления. Задача взаимодействия группы роботов как команды здесь определена как задача группового управления (управления группой роботов), для решения которой находятся векторы действий всех роботов $A_c(t)$ на промежутке времени $[t_c, t_f]$, которые обеспечивали бы экстремум функционала (1).

Трудность решение задачи группового управления в такой постановке в значительной степени зависит от характеристик среды функционирования, характера поведения агентов (роботов) и их количества. В динамических недетерминированных средах, в условиях функционирования агентов с противоположными целями, эффективных методов решения этой задачи не существует [1].

Необходимо отметить, что в работе [1], несмотря на то, что слово «интеллектуальный» употребляется достаточно часто, формальной модели интеллектуального робота, сформулированного в терминах моделей представления его знаний, и общепринятого определения интеллектуального робота, приведенного выше, практически нет.

Однако, интересно определение многоагентной системы как динамической системы, пространство состояний (SS) которой определяется как прямое произведение параметров всех агентов, объектов и состояний среды (E), т.е., $SS = \times_i R_i \times E$. В этом случае состояние системы «группа роботов-среда» S , определяет вектор значений всех свойств роботов и объектов и принадлежит пространству состояний (SS), $S \in SS$.

Интерес к этой модели вызван тем, что в когнитивной психологии, искусственном интеллекте пространство состояний SS может интерпретироваться как признаковое семантическое пространство, в котором объекты реального мира, различные ситуации представляются как понятия. При этом, в семантическом пространстве реальные объекты

(ситуации), по сути, денотаты, определяются именами и векторами значений признаков, определяющие их содержание (смысл). В семантических пространствах объекты (ситуации) с близкими свойствами образуют кластеры, по сути, классы объектов, а между классами объектов определяются отношения (класс-подкласс или род-вид), т.е. определяется понятийная структура. Необходимо отметить, что элементами знаний, представленных в семантических пространствах, являются знаки-символы.

Напомним, что в определении известного немецкого логика Г. Фреге [20], знаком называется тройка: имя, смысл и значение знака. Имя – это символ (образ, икона) обозначающее объект реального мира, смысл определяет свойства этого объекта, а значение – это и есть сам объект – денотат. В семантических пространствах реальный объект (денотат) имеет имя (символ) и представляется в признаковом пространстве как точка, координаты которой определяют значение признаков (смысл). Считается, что знак, определенный тройкой Фреге, связывает реальный мир с его ментальными представлениями. Напомним, что BDI архитектура агентов – это архитектура, в которой представлены ментальные состояния агента в терминах его убеждений, целей и намерений. Таким образом, модель представления знаний в виде семантического пространства теоретически может быть основой для модели агента с BDI архитектурой.

В этой работе в пространстве состояний динамической системы «группа роботов - среда», по сути, в семантическом пространстве, с помощью концептуального каркаса выделяются подпространства, определяющие классы возможных состояний среды функционирования. В концептуальном каркасе все классы возможных состояний имеют имена и образуют частично упорядоченное множество подпространств пространства состояний динамической системы «группа роботов - среда».

Особенность представления среды функционирования в виде концептуального каркаса заключается еще и в том, что имена классов состояний могут быть искусственными, важно только то, чтобы они были согласованы всеми агентами в многоагентной системе. Если агенты договорились об именах классов всех классов состояний, то такую качественную среду функционирования агентов можно уже рассматривать как качественную семиотическую среду функционирования с искусственными именами.

Таким образом, пространство состояний динамической системы «группа роботов-среда» может быть представлено как семантическое пространство, в котором выделены и структурированы и именованы, с помощью качественного концептуального каркаса, классы состояний среды функционирования агентов. Такое структурированное семантическое

пространство мы далее будем использовать в модели агента с BDI-архитектурой, в качестве модели его знаний о среде функционирования.

Качественное представление среды функционирования в модели интеллектуального агента с BDI-архитектурой в этой среде позволяет акцентировать внимание не на построении модели знаний агента (онтологии), которая требует больших трудозатрат, а на исследовании механизмов образования и функционирования команд интеллектуальных агентов с простой качественной моделью знаний. При этом сама BDI-архитектура агента сохраняется, только она по определению качественная.

Таким образом, предлагаемый подход больше ориентирован на решение исследовательских задач формирования и функционирования команд интеллектуальных агентов BDI-архитектурой.

Задача, которая поставлена в рамках этой статьи, заключается в том, чтобы, оставаясь, в рамках этого системного определения многоагентной системы, решить следующие задачи:

- Определить математическую модель качественной семиотической среды функционирования агентов;
- Определить модель агента с BDI-архитектурой в семиотической среде;
- Разработать алгоритмы построения семиотической среды функционирования группой агентов и согласования имен классов состояний среды;
- Разработать условия образования и функционирования команд агентов в семиотической среде.

2. Математическая модель качественной семиотической среды функционирования

Под средой функционирования агентов будем понимать «среду обитания» агентов, которая включает множество агентов и объектов, обладающих определенными свойствами (параметры агентов и объектов), автономностью, реактивностью (способностью реагировать на изменение состояния среды), проактивностью (способностью действовать самостоятельно для достижения своей цели), коммуникабельностью (способностью к общению и совместным действиям для достижения цели).

Дадим формальное определение среды функционирования агентов, опираясь на системную модель «Группа роботов-Среда». Считаем, что среда функционирования включает множество объектов $B = \{b_j\}$ и агентов $A = \{a_j\}$ и пусть известны множества свойств $F = \{f_i\}$ каждого из объектов (агентов) этой среды.

Пусть для каждого свойства каждого объекта или агента известны множество их возможных значений, $Z=\{Z_i\}$. Считаем, что множество значений свойства – это упорядоченное множество, т.е. $Z_i=\{z_{i1}, \dots, z_{iq}\}$, $z_{iq+1} \succ z_{iq}$, $q=0 \dots n-1$.

Определение 1. Среда функционирования - это гиперкуб, полученный прямым произведением множеств значений всех свойств объектов и агентов, $SF=\times_i Z_i$.

При таком определении среды функционирования агентов, каждый ее объект и агенты могут быть представлены в виде точек с координатами – значениями их свойств в пространстве SF , т.е. $a_j \in A=(z_{i1}, \dots, z_{im})$, $b_j \in B=(z_{je}, \dots, z_{nq})$, где (z_{ie}, \dots, z_{nm}) , $(z_{je}, \dots, z_{nq}) \in SF$.

Определение 2. Состоянием среды функционирования агентов будем называть вектор значений всех свойств агентов и объектов среды в некоторый момент времени t :

$$Z(t)=(z_{1e}, \dots, z_{1q}, \dots, z_{ne}, \dots, z_{nq}),$$

где (z_{1e}, \dots, z_{1q}) – вектор значений свойств первого агента или объекта, и так далее для каждого агента или объекта.

Считаем, что агенты могут изменять значения своих свойств и значения свойств объектов и других агентов, что является проявлением их реактивных и проактивных способностей.

Далее рассмотрим представление такой среды функционирования в виде качественной знаковой среды функционирования. Это позволит моделировать неоднородных агентов, т.е. агентов знания и представления которых о среде функционирования отличаются. Отличается и их возможное поведение в этой среде. Т.е. наша задача в данном случае заключается в построении модели агента с *BDI* архитектурой в знаковой среде функционирования и определение моделей и условий их индивидуального или командного поведения.

Для построения модели семиотической среды функционирования агентов осуществляется декомпозиция среды функционирования (см. Определение 1) на подпространства, которые определяют возможные классы состояний агентов (см. Определение 2) в виде знаков, задаваемых искусственными именами. Принципы декомпозиции среды функционирования на подпространства, позволяющие представить в виде частично упорядоченного множества подпространств, характеризующие классы возможных состояний описаны в работах [19]. Такая декомпозиция определяет формальную качественную понятийную систему предметной области и называется концептуальным каркасом.

2.1. Концептуальный каркас среды функционирования

Рассмотрим вопросы построения знаковой среды функционирования на примере. На рисунке 1 показан абстрактный агент, имеющий два признака $F=\{f_1, f_2\}$, значения которых

определяются из упорядоченных множеств значений $Z_1=\{Z_{11}, \dots, Z_{1n}\}$, $Z_2=\{Z_{21}, \dots, Z_{2m}\}$, начальное состояние агента ν $Z(0)=(z_{1r}, z_{2p})$, показано как точка с координатами (z_{1r}, z_{2p}) , в пространстве возможных состояний $FS=Z_1 \times Z_2$.

Г. Фреге определил знак тройкой [20]: имя, смысл (понятие) и значение знака. В логике определение знака – это определение понятия. Формально определим понятие - знак тройкой: $\langle d, F(d), V(d) \rangle$, где d – имя понятия, $F(d)=\{f_i, z_{ij}\}$ - содержание понятия (множество признаков и их значений, $z_{ij} \in Z_i, \forall j$), $V(d)$ – объем понятия, который включает множество объектов, удовлетворяющих содержанию понятия $F(d)$. Далее будем пользоваться именно этим определением.

В пространстве функционирования агента ν можно представить множество его состояний в виде векторов $Z(t)=(z_{j1}, \dots, z_{jm})$, $Z(t) \in FS, \forall t$. Обычно считается, что в пространстве задана метрика $\delta(\cdot)$, а состояния, имеющие близкие по значению признаки $\delta(Z(t); Z(t+m)) < \varepsilon$, принадлежат одному классу состояний, где ε определяет границы класса состояний.

Рассмотрим окрестность точки пространства, представляющей начальное состояние агента $Z(0)=(z_{i1} \pm \varepsilon_i, \dots, z_{im} \pm \varepsilon_m)$, где $z_{i1} \pm \varepsilon_i \in Z_i, i=1, \dots, m$.

Определение 3. Окрестность $z_i \pm \varepsilon_i$ значений i -го признака состояния $Z(0)$, определяющие класс состояний, будем называть интервалом толерантности класса по этому свойству (признаку) $\Delta_i = [z_{ik} + \varepsilon_{ik}, z_{ik} - \varepsilon_{ik}]$.

Определение 4. Подпространство $SS(d^0)$ пространства функционирования $SS(d^0) \subseteq FS$, полученное прямым произведением интервалов толерантности всех признаков состояния $Z(0)$ будем называть содержанием базового класса состояний $F(d^0)$ или областью толерантности базового класса состояний:

$$SS(d^0) = \times_i [z_{ik} + \varepsilon_{ik}, z_{ik} - \varepsilon_{ik}] = \times_i \Delta_i, SS(d^0) \subseteq FS, F(d^0) = SS(d^0).$$

На рисунке 2 показан пример базового класса состояний. Этому классу присваивается искусственное имя d^0 , содержание этого класса состояний определено как подпространство $SS(d^0) = \Delta_1 \times \Delta_2$ пространства FS . В подпространство включен агент (объект) с именем ν , значения признаков которого определены начальным состоянием $Z(0)$.

Т.е. в среде функционирования определен знак как класс возможных состояний с именем d^0 , с содержанием $SS(d^0)$ – определяющим границы класса состояний и объемом - $V(d^0) = \{\nu\}$, включающем денотат - агента ν .

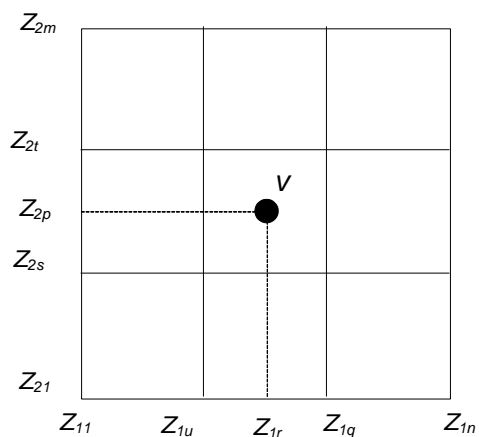


Рис.1. Агент $v=(z_{1r}, z_{2p})$ в среде функционирования

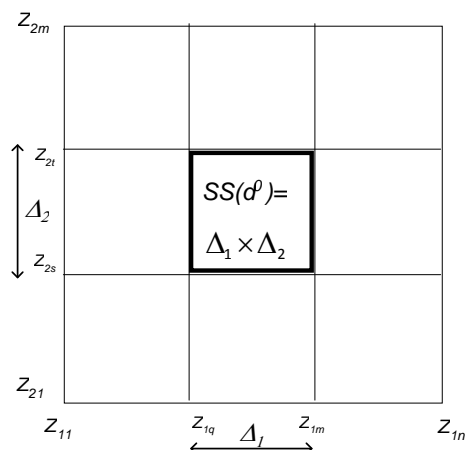


Рис.2. Базовый класс состояний агента

На рисунке 3 показан еще один знак среды функционирования. Он характеризует класс состояний за пределами базового класса, когда значение свойства Z_1 превышает границу этого свойства для базового класса (Z_1^+). Этот класс имеет имя – d^1 , границы класса определяются подпространством $SS(d^1)$ и объемом $V(d^1)$.

На рисунке 4 класс среды функционирования характеризует класс состояний тоже за пределами базового класса, но значение свойства Z_1 меньше границы этого свойства для базового класса (Z_1^-). Этот класс имеет имя – d^2 , границы класса определяются подпространством $SS(d^2)$ и объемом $V(d^2)$. Отметим, что эти два класса состояний отличаются от базового значениями одного свойства Z_1 .

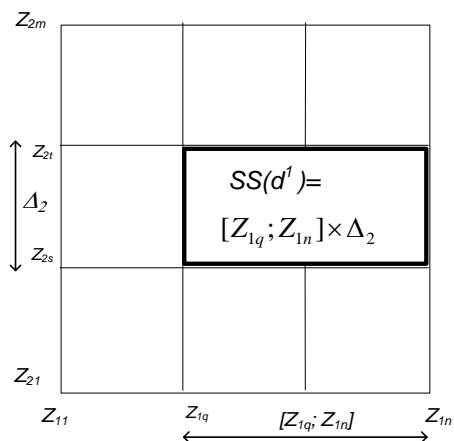


Рис.3. Обобщение базового класса состояний по признаку Z_1^+

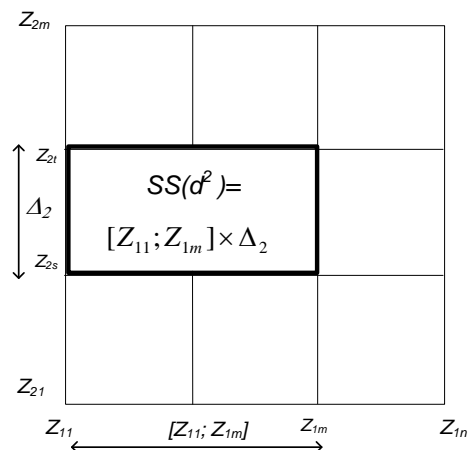


Рис.4. Обобщение базового класса состояний по признаку Z_1^-

На рис.5. показан класс среды функционирования, когда значения двух свойств Z_1 и Z_2 (Z_1^- и Z_2^+) перешли границы базового класса состояний d^0 . Этот класс состояний имеет имя – d^3 , границы класса определяются подпространством $SS(d^3)$ и объемом $V(d^3)$. Общее количество подпространств, определяющих классы возможных состояний – 3^N , где N – общее количество всех свойств агентов и объектов среды функционирования.

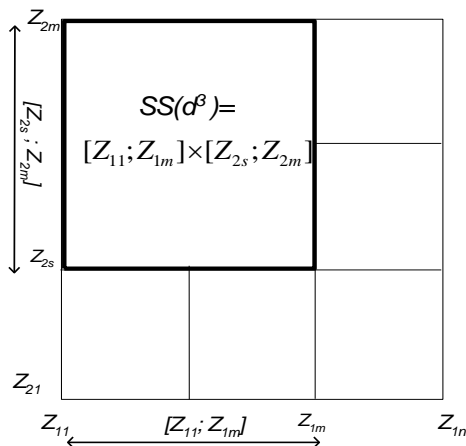


Рис.5. Обобщение базового класса состояний по признакам Z_1^- и Z_2^+

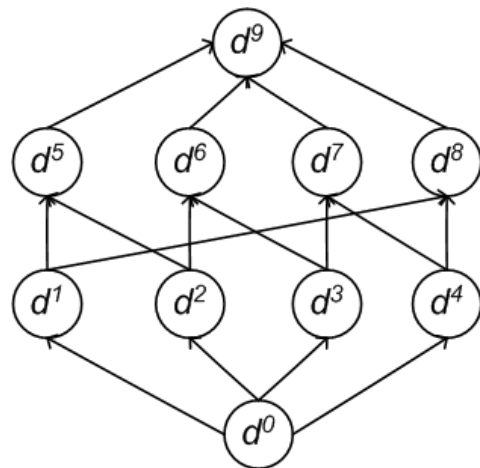


Рис.6. Диаграмма Хассе концептуального каркаса среды функционирования

Все классы состояний определены как знаки, определяемые именами, содержанием и объемом. В работе [19] было показано, что в пространстве состояний множество подпространств $\{SS(d^H)\}$, $SS(d^H) \subset SF$ образуют решетку $KK^W = (\{SS(d^H)\}, \cap, \cup)$, структурирующую это пространство. Такая структуризация пространства называется качественным концептуальным каркасом и отражает качественную идеализированную структуру знаний (онтологию) об этой среде [19]. Все подпространства $SS(d^H)$ в данном случае интерпретируются как классы состояний среды функционирования и характеризуются тройкой: d^H – имя класса; $SS(d^H)$ – содержание класса и $V(d^H)$ – объем класса – это множество объектов среды, значения свойств которых попадает в подпространство $SS(d^H)$.

На рисунке 6 знаковая структура среды функционирования представлена в виде диаграммы Хассе. На первом уровне этой диаграммы показаны все имена подпространств среды функционирования, которые обобщают базовый класс состояний только по одному признаку (свойству). На втором уровне этой диаграммы представлены имена классов состояний, обобщающие базовый класс по двум признаком.

Определение 5. Качественной семиотической средой функционирования будем называть концептуальный каркас $KK^W = (\{d^H\}, \wedge, \vee)$ – частично упорядоченное множество имен классов состояний (d^H) , которые однозначно определяют вложенные подпространства среды функционирования – содержание $SS(d^H)$, и объем класса состояний $V(d^H)$, $V(d^H) \neq \emptyset$, если $\exists v = (z_{j1}, \dots, z_{jm}) \in SS(d^H)$.

В работе [19] было определено соответствие φ вектора значений $Z(t)$ и имени класса состояний среды функционирования, заданных в концептуальном каркасе:

$$\varphi: Z(t) \rightarrow d^H \subseteq KK^W, \quad (2)$$

Соответствие (2) позволяет интерпретировать множество векторов $\{Z(t)\}$, $t \in \{1, \dots, n\}$, значения которых попадают в разные подпространства концептуального каркаса KK^W с помощью имен классов состояний среды функционирования.

Состоянием среды функционирования агентов в терминах знаков концептуального каркаса среды функционирования будем называть вектор имен классов состояний концептуального каркаса, к которым принадлежат значения свойств объектов и агентов $(A \cup B)$.

Определение 6. Качественное состояние среды функционирования $Z^*(t)$ определяет вектор имен классов состояний, в которых находятся агенты и объекты. Т.е.

$$Z^*(t) = \varphi(z_{1e}, \dots, z_{1q}, \dots, z_{ne}, \dots, z_{nq}) = (d_1^{H1}, \dots, d_n^{Hn}), H=1, \dots, 3^N.$$

Таким образом, качественная знаковая среда функционирования определяется концептуальным каркасом KK^W и состоянием этой среды $Z^*(t) \subseteq KK^W$.

Например, имя класса d_1^1 в позиции первого агента однозначно определяет, содержание класса – подпространство $SS(d^1)$, и объем $V(d^1) = a_1$, $a_1 \in A$, агента, значения признаков которого принадлежат подпространству, $(z_{1j}, \dots, z_{1q}) \in SS(d^1)$.

Отметим также, что в работе [19] соответствие (2) сформулировано в виде правила, связывающего состояние среды функционирования как вектора значений признаков с именем класса состояний концептуального каркаса. Это означает, что в процессах исследования поведения агентов, перечислять все классы состояний концептуального каркаса не надо. Достаточно применять это правило к любому вектору значений признаков агента, чтобы определить имя класса состояний, в котором он находится.

Заключение

В первой части статьи приведен краткий обзор моделей образования и функционирования команд агентов с реактивной архитектурой и интеллектуальных агентов с BDI-архитектурой. Несмотря на теоретический задел в области командного поведения агентов, существования

стандартов для языков представления знаний, программных сред разработки многоагентных систем, а также языков коммуникации агентов и протоколов обмена информацией, концептуальные исследования образования и функционирования больших команд интеллектуальных агентов остаются актуальными. Проблема заключается в сложности ручного создания моделей знаний (онтологий) о среде функционирования для большого количества агентов. В работе предложено в качестве основы для моделей знаний интеллектуальных агентов использовать качественные концептуальные каркасы среды их функционирования. Это значительно упрощает процесс создания онтологий агентов и позволяет, используя простые качественные модели знаний агентов, акцентировать внимание на исследование механизмов и принципов образования и функционирования команд интеллектуальных агентов.

В этой части статьи определены основные задачи, которые необходимо решить для проведения исследований поведения групп интеллектуальных агентов в качественной семиотической среде.

Приводится математическая модель качественной семиотической среды функционирования, основанная на представлении пространства состояний динамической многоагентной системы «группа роботов-среда» в виде концептуального каркаса имен классов состояний. Введены основные понятия и определения качественной семиотической среды функционирования, которые используются во второй части статьи при определении моделей и алгоритмов формирования и функционирования агентов в качественной семиотической среде.

Литература

1. *Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г.* Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.-279 с.
2. *Городецкий В.И.* Теория, модели, инфраструктуры и языки спецификации командного поведения автономных агентов. Обзор (Часть 1) // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – №2. – С. 19–30.
3. *Новиков Д.А.* Математические модели формирования и функционирования команд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 184 с.
4. *Wooldridge M. J.* The Logical Modeling of Computational Multi-Agent Systems. PhD thesis. Manchester. 1992.. 153 p.
5. *Kripke S.* Semantic Analysis of Modal Logic. Zeitschrift fur Mathematische Logik und Grundlagen der Mathematik, No.9, 1963, pp. 67-96.
6. *Rao A.S., Georgeff M.P.* BDI Agents: From Theory to Practice // Proc. First International Conference on Multi-Agent Systems (ed. V.Lesser). – AAAI Press/The MIT Press, 1995. – P. 312–319.
7. *Cohen P., Levesque H.J.* Teamwork. Nous, 25(4), (1991) Special Issue on Cognitive Science and Artificial Intelligence, P. 487-512.

8. *Grosz B., Kraus S.* Collaborative Plans for Complex Group Actions // Artificial Intelligence. – 1996. – №86. – P. 269–358.
9. *Цетлин М.Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969. – 316 с.
10. *Стефанюк В.Л., Цетлин М.Л.* О регулировке мощности в коллективе радиостанций // Проблемы передачи информации. – 1967. – Т. 3, №4. – С. 59–67.
11. *Варшавский В.И., Поспелов Д.А.* Оркестр играет без дирижера. – М.: Наука 1984. – 208 с.
12. *Карпов В. Э.* Модели социального поведения в групповой робототехнике / Управление большими системами. Выпуск 59. М.: ИПУ РАН, 2016. С.165-232.
13. *Павловский В.Е., Павловский В.В.* Математическая модель двумерной гомогенной стаи роботов // Искусственный интеллект и принятие решений. М.: URSS, 2015, №4, с. 62-71.
14. *Оуэн Г.* Теория игр. – М.: Мир, 1971. – 230 с.
15. *Смирнов А.В., Шереметов Л.Б.* Модели формирования коалиций кооперативных агентов: состояние и перспективы исследований // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – №1. – С. 36–48.
16. *Conte R., Edmonds B., Moss S. and etc.* Sociology and Social Theory in Agent Based Social Simulation // A Symposium: Computational and Mathematical Organization Theory. – 2001. – Vol. 7, №3. – P. 183–205.
17. *Sichman J., Conte R., Castelfranchi C. et al.* A social reasoning mechanism based on dependence networks // Proc. 11th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), Amsterdam, Netherlands, 1994 – P. 188–192.
18. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
19. *Кулинич А.А.* Концептуальные каркасы онтологий слабо структурированных предметных областей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. - № 4. - С. 31-41.
20. *Бирюков Б.В.* Теория смысла Готлоба Фреге / В кн.: Применение логики в науке и технике. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С. 502–555.

Сведения об авторе:

1. *Фамилия, имя, отчество:* Кулинич Александр Алексеевич.
2. *Место работы и должность в настоящее время:* Федеральное Государственное учреждение науки Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, старший научный сотрудник.
3. *Год окончания учебного заведения и его полное название:* 1981 г., Государственный технический университет Армении (ЕрПИ).
4. *Ученая степень и звание:* Кандидат технических наук.
5. *Количество печатных работ и монографий:* более 90-а печатных работ.
6. *Область научных интересов.* Искусственный интеллект, поддержка принятия решений, когнитивная психология.
7. *Адрес электронной почты и телефон:* kulinich@ipu.ru, alexkul@rambler.ru. Телефон: 8 (495) 334-76-39.