

Г.А. КИСЕЛЁВ, А.И. ПАНОВ
**ЗНАКОВЫЙ ПОДХОД К ЗАДАЧЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РОЛЕЙ В
КОАЛИЦИИ КОГНИТИВНЫХ АГЕНТОВ**

Киселёв Г.А., Панов А.И. Знаковый подход к задаче распределения ролей в коалиции когнитивных агентов.

Аннотация. В настоящей работе рассмотрена задача распределения ролей при составлении общего плана действий в коалиции когнитивных агентов. Когнитивные агенты реализуют основные функции интеллектуального агента с использованием моделей когнитивных функций человека, к которым относятся применяемые в данной работе функции обучения концептуальным знаниям и планирование коллективного поведения. В работе представлен оригинальный метод распределения ролей — алгоритм MultiMAP, основанный на знаковом способе планирования поведения агента. Представлены основные особенности описываемого подхода, включающие способы представления знаний агента о себе и о других агентах, способы знаковой коммуникации и сохранения опыта кооперации с другими агентами. Описаны модельные эксперименты, демонстрирующие основные преимущества представленного подхода и некоторые недостатки, на устранение которых направлена будущая работа в данном направлении.

Ключевые слова: когнитивные агенты, коалиции агентов, планирование, распределение ролей, знак, знаковый подход, теория деятельности.

1. Введение. В настоящей работе представлен оригинальный подход к синтезу общего плана поведения для группы интеллектуальных агентов. В качестве примера агентов, для которых задача распределения ролей в общем плане особенно актуальна, можно рассмотреть робототехнические системы, обладающие различными типами манипуляторов, предназначенных для взаимодействия с объектами внешней среды, которые обладают дополняющими деятельность других агентов характеристиками. Например, одни агенты могут оперировать исключительно крупными объектами, которые можно поднять только мощным манипулятором, а другие — лишь небольшими объектами, требующими более точного и менее мощного инструмента. Некоторые агенты способны передвигаться между объектами инфраструктуры в пределах одного города, а другие совершать междугородние перелеты. Такое различие в функциональности приводит к тому, что задачи, которые не мог решить один интеллектуальный агент, могут быть решены группой кооперирующихся агентов, которые учитывают специфику способностей других агентов при составлении общего плана.

В настоящей работе для представления знаний агента о процессах и объектах внешней среды, знаний о себе и о других агентах используется модель знаковой картины мира [1, 2], которая является формализацией качественной теории целенаправленного поведения человека в социуме — психологической теории деятельности [3]. На

основе знаковой картины мира удастся построить психологически правдоподобные модели ряда когнитивных функций человека: планирования поведения, целеполагания, категоризации и обобщения [2], которые, в свою очередь, применяются для построения когнитивных агентов, обладающих более высокой степенью автономности по сравнению с существующими интеллектуальными агентами [4]. В дальнейшем будут использоваться принятые в математической теории картины мира термины и понятия, заимствованные из психологии, но имеющие точные формальные определения.

Базовым элементом картины мира является четырехкомпонентная структура — знак, который сочетает в себе как декларативные, так и процедурные знания об объекте, процессе или субъекте деятельности (см. формальное определение в [2]). Каждая компонента знака: образ, значение и личностный смысл — отвечает за определенный тип информации, относящейся к представляемому объекту или процессу. Особенностью предлагаемого подхода является то, что агент хранит представление знаний о себе и о своих способностях, а также о способностях других агентов в тех же структурах, что и информацию об объектах внешней среды — в знаках «Я», «Агент 1», «Агент 2» и так далее. Как будет продемонстрировано ниже, это позволяет составлять коллективный план с использованием той же процедуры, с помощью которой производилось индивидуальное планирование.

Статья посвящена описанию оригинального метода коллективного планирования MultiMAP, который включает в себя этап распределения ролей и является расширением ранее предложенного алгоритма MAP [5] индивидуального планирования поведения в знаковой картине мира. Предложенный алгоритм коллективного планирования является итерационным и иерархическим. В нем используется информация о способностях как самого агента, так и других членов коалиции, а также предыдущий опыт составления и согласования планов. В работе описана процедура согласования планов, использующая оригинальный протокол коммуникации и сообщения, вырабатываемые на основе знаковой картины мира агента. В качестве иллюстрации особенностей предложенного алгоритма рассмотрен ряд экспериментальных задач, в которых используются следующие утверждения: а) все агенты обладают актуальной информацией о способностях других агентов; б) состав коалиции и способности агентов не меняются в процессе планирования; в) способности агентов могут частично совпадать, то есть имеются действия, которые могут совершить одновременно несколько агентов; г) все агенты имеют общую цель и не ставят свои собственные подцели; д) план согласуется централизованным способом; е) этап

выполнения плана не рассматривается, поэтому в качестве опыта сохраняется история планирования. В работе даны примеры вводимых понятий и проведены модельные эксперименты с использованием ряда известных в классическом планировании задач (доменов), таких как «Мир кубиков» [6], «Логистика» и так далее. В заключении проведено обсуждение основных преимуществ предлагаемого подхода и перспективных направлений развития представленных работ.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 приводится краткий обзор наиболее значимых работ по распределению ролей в многоагентных системах (МАС). В разделе 3 даны базовые принципы знакового подхода к представлению знаний и введены основные понятия. В разделе 4 представлен алгоритм планирования в группе агентов, которые используют знания о других агентах для распределения ролей. В разделе 5 даны результаты модельных экспериментов и их обсуждение.

2. Обзор работ по планированию в группе агентов. Для решения задач, которые невозможно выполнить одним агентом, используются различные виды многоагентных систем (МАС), которые в зависимости от сложности организации называются группами, роями, стаями. Основными причинами объединения агентов в МАС являются: отсутствие достаточного количества ресурсов для самостоятельного достижения целевой ситуации, наличие общих целей и функциональное дополнение друг друга. Методы многоагентного планирования применяются для большого спектра прикладных задач, в которые входят задачи логистики, моделирования предприятий, политических ситуаций и другие. Для осуществления распределения действий в МАС используются алгоритмы планирования и алгоритмы, реализующие протоколы коммуникаций между участниками кооперации [7, 8]. Рассмотрим основные проблемы, возникающие в многоагентном планировании и включающие проблему динамического перепланирования при наличии факторов, не позволяющих агенту совершить требуемое действие (поломка агента, наличие внешних факторов), проблему использования проверенных агентов (тех, с кем имеются прецеденты действия) и проблему избыточности, распространяемой агентами информации. Данные проблемы нашли решение в предлагаемом в статье подходе и далее будут рассмотрены некоторые аналогичные работы, связанные с планированием.

В рамках построения многоагентного плана действий, планирующий агент должен иметь представление о возможностях всех агентов МАС. Процесс построения коллективного плана занимает большое количество времени, поэтому отказ от выполнения предписанных агенту-участнику действий ведет к замедлению работы всей системы.

Наличие возможности выполнить одно и то же действие с помощью различных агентов позволяет динамически перестроить многоагентный план без кардинального изменения планов других участников МАС. В качестве примера способов динамического перепланирования в процессе взаимодействий агентов рассмотрим работу [9], в которой агенты могут создавать свои индивидуальные планы в рамках совместной работы над общим планом. Для построения совместного плана агентов авторы приводят ряд обязательных условий: во-первых, все агенты должны быть согласны с набором соблюдаемых параметров для достижения целевой ситуации. Примером параметра может служить часть карты, в которой агенты совершают действия и за которую не следует выходить. Выработка общего набора параметров может осуществляться с помощью различных средств достижения агентами соглашений, например с помощью аукционов [10], контрактных сетей [11], моделей социальных соглашений [12] и так далее. Во-вторых, группы агентов должны составлять план действий только из тех действий, которые агенты в группах способны выполнить. В-третьих, групповой план может иметь в качестве компонентов как планы индивидуальных агентов, так и групповые планы входящих в нее подгрупп. Планы каждого из агентов состоят из набора действий по достижению цели, где каждое комплексное действие является подпланом по достижению подцели задачи и имеет несколько абстрактных уровней заполненности готовыми действиями. Здесь под заполненностью подразумевается различная степень выполнения поддействий комплексного действия. После окончания процесса планирования группа агентов приступает к реализации плана. По мере взаимодействия каждого агента группы с окружающей средой и группами других агентов происходит процесс заполнения общего плана действий, который заполняется законченными действиями других агентов. Учитывая динамику окружающей среды, какое-то действие может оказаться невыполнимым в текущих условиях, поэтому агент должен иметь возможность вернуться к предыдущему уровню описания плана, на котором это действие отмечено как невыполненное. Каждый агент имеет дерево соблюдаемых параметров для выполнения определенного группового действия, которое состоит из множеств ограничений и поддействий, по мере взаимодействия с другими агентами и окружающей средой, агент пополняет свое дерево соблюдаемых параметров. Каждый агент решает вступать ли ему в кооперацию с остальными участниками коллектива на основе вероятностной шкалы осуществления действий другими агентами. Это представление создается при помощи опытного взаимодействия с другими членами кооперации, основываясь на прецедентах

действий исследуемого агента с другими агентами. Например, исследуемый агент может продолжить совершение коллективного плана даже при изменении его отношения к ранее согласованным параметрам действий плана, выразив тем самым свою надежность в роли партнера, либо агент отказывается от следования ранее составленному плану во время процесса его выполнения, заставляя всех агентов-участников перепланировать свои действия. В процессе совершения действий в рамках реализации группового плана работ агент выстраивает шкалу доверия, по которой оценивается вероятность будущих повторных взаимодействий с другими агентами.

Понятия доверия и надежности агента рассматривается в модели *Beliefe-Desire-Intention (BDI)*, которая описана в статье [13]. В модели BDI используются так называемые графы репутации [14], отражающие вероятностную модель межагентных взаимодействий внутри коллектива. Согласно принципам модели К. Рейнольдса [15], агенты взаимодействуют при выполнении локальных задач без управляющего внешнего воздействия, согласно своим представлениям о вовлеченности других агентов коллектива в свою стратегию достижения цели и о взаимозаменяемости агентов. Эти представления возникают из-за наличия определенного набора доступных действий у каждого из агентов, часть которых может быть выполнена другими агентами. Так как агенты взаимозаменяемы, возникает проблема распределения ролей при составлении многоагентного плана действовани^я. Наличие собственной стратегии достижения цели у каждого из агентов, в которой субъектами действовани^я могут выступать другие агенты, способствует увеличению времени на построение общего плана действий. Для уменьшения комбинаторной сложности задачи выбора субъекта действия, в модели BDI используются графы репутации, которые составляются на основе опыта планирующего агента, полученного при взаимодействии с другими участниками коллектива. Помимо использования собственного опыта планирования, агент может выстраивать графы репутаций, основываясь на опыте других участников кооперации [16], запрашивая их мнение относительно остальных агентов планирования. Для построения графа репутации агент использует два основных протокола сообщений: разведывательный протокол и протокол запросов [17]. Разведывательный протокол позволяет опрашивать окружающих агентов по поводу заведомо знакомых агенту вещей, что позволяет дать оценку правдивости опрошенного агента. После завершения процедуры оценивания правдивости окружающих агентов, агент использует протокол запросов и опрашивает мнение агентов, подтвердивших свою правдивость. Множество гетерогенных агентов с

архитектурой, описанной в статье, имеют проблемы с устойчивостью протоколов коммуникаций и с подбором необходимого протокола для каждого агента персонально.

Многие протоколы коммуникаций агентов в МАС распространяют избыточную информацию об агенте. В статье [18] представлен алгоритм многоагентного планирования MA-STRIPS, в котором реализован протокол коммуникаций агентов без распространения избыточной информации. На первом шаге алгоритма происходит считывание задачи планирования, описанной на многоагентной версии языка PDDL [19]. На следующем шаге агенты разбивают факты задачи на три подгруппы: публичные, внутренние и смешанные. Факт считается публичным, если он задействован в действиях минимум двух агентов; факт является внутренним, если он не публичен, но задействован хотя бы в одном действии планирующего агента; факт является смешанным, если он публичный или внутренний для агента. Затем осуществляется процесс планирования, который заключается в построении каждым агентом недетерминированного конечного автомата (НКА), представляющего все доступные агенту варианты планов. Планировочный конечный автомат для STRIPS [20] задачи $\Pi = \langle P, A, I, G \rangle$ — это НКА $\Gamma = \langle A, S, I, \delta, F \rangle$, в котором A — алфавит действий Π , состояния из S — это подмножества P (множества условий задачи), δ это функция перехода на множестве состояний, а $F \subseteq S$ содержит все состояния, которые удовлетворяют цели G . Чтобы избежать путаницы, авторы предлагают, что алфавит A содержит уникальные идентификаторы действий, а не полные действия. Публичная версия недетерминированного конечного автомата, состоящая только из публичных фактов, рассылается другим субъектам планирования по цепочке. После получения сообщения со всеми возможными планами другого агента, агенты коалиции пытаются расширить получившийся автомат до достижения конечной ситуации планирования. Такой подход создает большое количество возможных вариантов достижения целевой ситуации, что приводит к увеличению времени на поиск оптимального для всех агентов плана.

Рассмотренные подходы используют психологическую составляющую деятельности агентов для описания понятий доверия, надежности (BDI), избыточности информации (MA-STRIPS) и других факторов, и одновременно не учитывают единый способ представления знаний [2] всеми агентами коалиции. Унифицированный способ представления знаний всеми членами группы является немаловажным фактором при выборе способа коммуникаций агентов [21]. Протокол коммуникации агентов зависит от состава исполняемых ими ролей, процесс распределения которых является трудоемкой задачей. От решения

задачи распределения ролей зависит достижение поставленных целей коалиции [22]. Когнитивные агенты способны осуществлять деятельность, раскрывающую возможности не только одной выполняемой роли, но сразу нескольких. Так как качество выполняемых агентами действий может быть различным, процесс распределения ролей служит для создания наиболее подходящих составов групп агентов [23], которые имели опыт выполнения требуемых действий.

Далее в статье изложен психологически правдоподобный метод решения конфликтных ситуаций при распределении ролей между агентами, представления знаний о других агентах [24, 25] и построения коллективного плана действий агентов.

3. Знаковый подход к синтезу поведения агента. В настоящей работе в качестве основного способа представления знаний используется модель знаковой картины мира, базовым элементом которой является четырехкомпонентная структура, называемая знаком [2, 4]. Знак может представляться как статический объект, так и действие. Знак задается именем и содержит компоненты образа, значения, личностного смысла. Компонента образа содержит характерные признаки представляемого объекта или процесса. Компонента значения представляет доступные коллективу агентов обобщенные сценарии использования объектов. Компонента личностного смысла знака несет информацию о личном значении объекта для агента, то есть о текущей ситуации или ситуации, имевшей место в прошлом, составной частью которой является данный объект. Личностные смыслы знака формируются в процессе деятельности субъекта и являются конкретизацией сценариев из значений этого знака. Они задают предпочтения субъекта деятельности и формируют опыт выполнения действий или планирования.

Компоненты знака составляют специальные семантические (каузальные) сети, в узлах которых располагаются так называемые каузальные матрицы. Каждая каузальная матрица представляет собой последовательность списков (столбцов) признаков данного компонента знака. Признаками являются либо элементарные данные с сенсоров, либо ссылки на соответствующие знаки. Каузальная матрица бывает двух типов: объектные, столбцы которых равнозначны (представляют описание статических объектов), и процедурные, столбцы которых следуют в определенном порядке, моделируя следование причины за следствием (представляют описание действий и процессов). Например, каузальная матрица знака «Находиться на» состоит из двух столбцов: в левый столбец входит знак блока X, а в правый — знак блока Y, что означает, что блок X находится на блоке Y. Другим примером каузальной матрицы можно рассмотреть процедурную каузальную матрицу действия

«Поднять» из задачи «Мир блоков». В левую часть матрицы входят условия действия: столбец, в который включены ссылка на знак блока, который требуется поднять, ссылка на знак размера блока, например «Большой», и ссылка на связанный с ним знак «Тип-блока». В следующий столбец входят ссылки на знак «Пустой», обозначающего отсутствие блоков на целевом блоке и ссылка на знак целевого блока. В третий столбец включены ссылки на знак «На столе», обозначающего наличие целевого блока на столе и ссылка на знак целевого блока. Еще один столбец включает ссылку на знак «Актuator пуст», обозначающего отсутствие блоков в манипуляторе агента и ссылку на знак агента. В правую часть матрицы входит столбец с ссылкой на знак «Актuator не пуст», обозначающий наличие целевого блока в манипуляторе агента, ссылка на знак агента и ссылка на знак целевого блока. Следующий столбец эффектов включает ссылку на знак целевого блока и связанные с ним знаки «Тип блока» и «Большой» (рисунок 1).

	I	II	III	IV	V	VI
Тип-блока	■				■	
Большой	■				■	
Блок а	■	■	■		■	■
Пустой		■				
На-столе			■			
Актuator-пуст				■		
Агент1				■		■
Актuator-не-пуст						■

Рис. 1. Каузальная матрица знака действия «Поднять» в задаче «Мир блоков». Матрица является битовой матрицей, единицы которой обозначены серым, а нули – белыми клетками. Столбцы I, II, III, IV является столбцами условий, V и VI – эффектов

Другим примером каузальной матрицы является матрица знака ситуации, в левую часть которой входят столбцы с ссылками на объектные и процедурные знаки (рисунок 2). Например, каузальная матрица начальной ситуации задачи «Логистика» будет включать столбцы со ссылками на знаки перевозимых объектов «Объект1», ..., «ОбъектN», ссылками на связанные с объектными знаками, знаки типов объектов «Тяжелый», «Легкий» и так далее ссылки на объектные знаки «В», «Находится», «Дислокация» и другие.

	I	II	III
C/з объекта	■	□	□
C/з объекта	□	■	□

I

	I	II	III	IV	V	VI
C/з отношения	■	□	□	□	■	□
C/з характеристики	■	■	□	□	■	□
C/з объекта	■	■	■	□	■	■
C/з отношения	□	■	□	□	□	□
C/з отношения	□	□	■	□	□	□
C/з отношения	□	□	□	■	□	□
C/з объекта	□	□	□	■	■	■
C/з отношения	□	□	□	□	■	■

II

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
C/з отношения	■	□	□	□	□	□	□	□	□	□
C/з объекта	■	□	■	□	□	■	□	□	□	□
C/з отношения	□	■	□	□	□	□	□	□	□	□
C/з объекта	□	■	□	□	■	□	□	□	□	□
C/з отношения	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
C/з характеристики	□	□	■	□	□	□	□	□	□	□
C/з отношения	□	□	□	■	□	□	□	□	□	□
C/з отношения	□	□	□	□	■	□	□	□	□	□
C/з характеристики	□	□	□	□	■	■	□	□	□	□
C/з объекта	□	□	□	□	□	■	■	□	□	□
C/з отношения	□	□	□	□	□	■	■	□	□	□

III

Рис. 2. Пример: I) объектная каузальная матрица; II) процедурная каузальная матрица; III) каузальная матрица ситуации (с/з – ссылка на знак)

Для каждой из трех каузальных сетей описан ряд семантических отношений на множестве знаков [2]. Так среди отношений на множестве $\langle W_p(s), W_m(s), W_a(s), R_n, \Theta \rangle$ знаков на сети значений есть отношение класс-подкласс, когда для одного знака, обозначающего какую-либо роль, может быть несколько играющих эту роль знаков, формирующих его каузальную матрицу на сети значений.

Формально, знаком s называют кортеж из четырех компонент: $\langle n, p, m, a \rangle$, где n — имя знака, p — образ знака, соответствующий узлу $w_p(s)$ каузальной сети на образах, m — значение знака, соответствующий узлу $w_m(s)$ каузальной сети значений, a — личностный смысл знака, соответствующий узлу $w_a(s)$ каузальной сети на смыслах. R_n — отношения на множестве знаков, а Θ — операции на множестве знаков, полученные на основе фрагментов каузальных сетей, к которым принадлежат соответствующие компоненты знаков. Кортеж из пяти элементов $\langle W_p, W_m, W_a, R_n, \Theta \rangle$ является моделью картины мира агента.

Модель знаковой картины мира в настоящей работе используется в качестве базового способа представления знаний каждым агентом для построения как индивидуального, так и коллективного планов. В рамках процесса по нахождению плана осуществляется обратный процесс планирования (от целевой ситуации), подробно описанный в разделе 4.2. Агенты совершают различные действия, исходя из своих личностных смыслов, и пытаются достичь целевой ситуации. Знания о возможностях планирующего агента и других агентов представлены каузальными матрицами на сетях личностных смыслов знака «Я» и знаков «Агент1», «Агент2», ... для каждого агента соответственно. Агенты создают планы по достижению целевой ситуации, распределяя роли агентов действия, исходя из критериев выполнимости действия различными агентами. Как и любой знак, знак «Я» состоит из личностных смыслов агента, осуществляющего процесс планирования, его образа и значений. Образ самого агента и других участников группы представляет основные характеристики агента, важные для распознавания других агентов и объектов по данным сенсоров, поэтому в настоящей работе этот компонент опущен. Значение знака «Я» и знаков других агентов — это обобщенные сценарии (действия), в которых агент может выступать субъектом либо непосредственно, либо через свои классы. Все действия, которые может совершить агент, представлены в его личностных смыслах и являются частично конкретизированными значениями, роли субъектов и объектов, в которых предзаполняются в соответствии с блоком его ограничений, представленных в задаче планирования. Пример знака «Я» в задаче «Логистика» приведен на рисунке 3. Планирующим агентом является агент-«грузовик», сеть личностных смыслов которого включает матрицы действий «загрузить», «разгрузить» и «вести грузовик». Матрицы всех действий частично конкретизируются, оставляя не конкретизированными часть знаков ролей объектов.

Знаки других агентов связаны отношением класс-подкласс с абстрактным знаком «Они». В знаки агентов входят представления агента об остальных агентах, полученные из общего описания задачи планирования. В каузальную матрицу на сети значений знака «Они» входят ссылки на знаки других агентов.

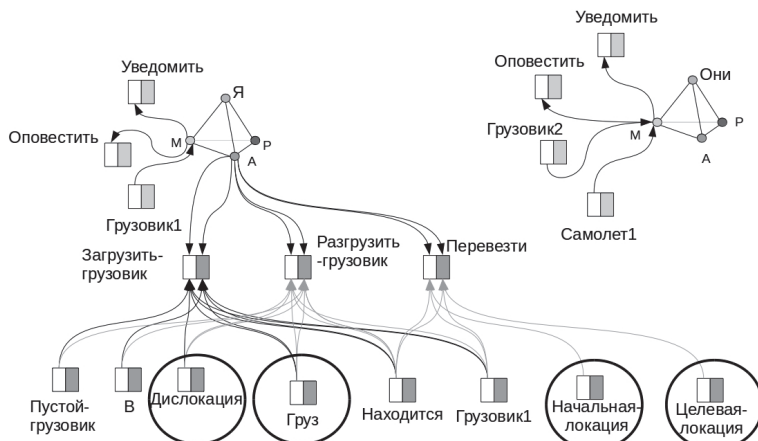


Рис. 3. Знак «Я» (слева) и знак «Они» (справа) в задаче «Логистика». Направление стрелок на рисунках обозначает отношения класс-подкласс на сети значений и тип-подтип на сети личностных смыслов. Знаки ролей обведены чёрными овалами

Примером знака другого агента в задаче «Логистика» является знак «Самолёт1», в личные смыслы которого входят каузальные матрицы действий «Загрузить-самолёт», «Разгрузить-самолёт» и действия «Перелёт-самолёта» (рисунок 4), а в значения знаки ролей, характеризующие агента «Самолёт1» как объект, средство передвижения и самолет.

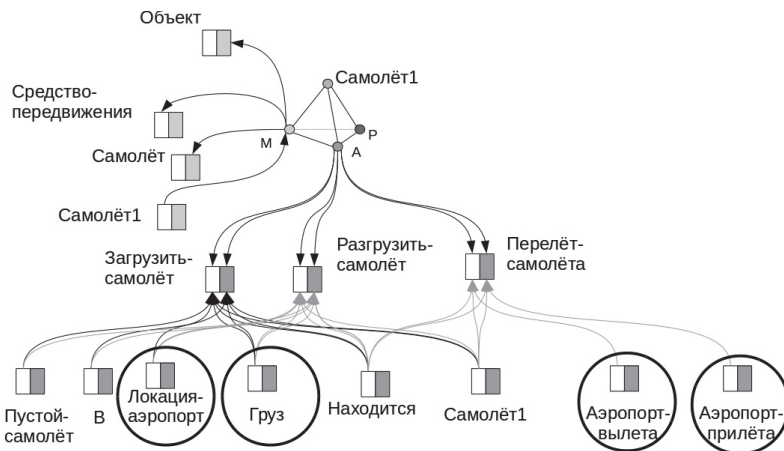


Рис. 4. Знак агента «Самолёт» из задачи «Логистика»

4. Распределение ролей в процессе планирования. В настоящей работе под интеллектуальным агентом будет пониматься аппаратная или программная система, обладающая свойствами автономности,

реактивности, активности и коммутативности. Эти свойства позволяют агенту взаимодействовать со средой, которая включает в себя различные типы объектов. Планом P агента A_k будем называть последовательность действий $P(A_k) = \langle a_1(A_{i1}), a_2(A_{i2}), \dots \rangle$, полученных в результате работы алгоритма планирования, где A_{ij} — агент, выполняющий действие a_j . План формируется агентом на основе цели, информации о текущем состоянии окружающей среды и динамике ее изменения. Описание среды и задачи представлено на языке PDDL3 или ML-PDDL [26]. В домен задачи $D = \langle V, TO, A \rangle$ включены описания предикатов V , типов объектов TO и действия агентов A . В описание действия $a = \langle n, Cond, Eff \rangle$ входит имя действия n , список его предусловий $Cond$ и эффектов выполнения Eff . В список предусловий входят предикаты, формирующие условие применения этого действия, а в эффект — предикаты, значение которых стало истинным после применения действия. Типы объектов объединены в иерархию класс-подкласс. Предикаты описывают некоторое утверждение об объекте (например, предикат <размер блока>: большой блок). В домен планирования входят общие предикаты, которые описывают вид отношений между объектом некоторого типа и конкретным его свойством. В задачу планирования T входят специфицированные предикаты, где на место абстрактного типа подставлены конкретные значения. В задаче планирования в предикатной форме описаны начальное Sit_{start} и конечное Sit_{goal} состояние среды. Также, в задачу планирования входит блок ограничений на действия агентов $C(ag)$, состоящий из утверждений, истинных для конкретных агентов.

В процессе составления плана, учитывающего действия других агентов, наибольший интерес представляет этап выбора не только подходящего действия, но и подходящего агента. Включение процесса распределения ролей в алгоритм индивидуального планирования в знаковой картине мира привело к созданию алгоритма multiMAP, который состоит из четырех основных этапов: этап означивания, этап индивидуального планирования, этап согласования планов и этап сохранения опыта.

4.1. Этап означивания. На этапе означивания агент заполняет собственную картину мира знаками объектов, предикатов и действий, полученными из описаний домена и задачи планирования. Создаются объектные и процедурные каузальные матрицы на сетях значений и личностных смыслов. Создаются знаки «Я» и «Они», которые служат представлением о возможностях других агентов в картине мира агента.

Этап означивания начинается с процесса получения задачи планирования в предикатном виде. Домен и задача планирования описаны на языке ML-PDDL. Задача планирования состоит из набора фактов, описывающих объекты среды (в поле :объекты), начального и конечного состояний агентов (:начало и :цель) и ограничений на действия

агентов (поле :ограничения). В домен задачи включены описания предикатов, типов объектов и действия агентов. После получения домена и задачи планирования создается проблема планирования, в которой формируются знаки агентов (шаги 2-10 листинга 1), в значения знака «Я» добавляется каузальная матрица знака планирующего агента (шаг 8), в сеть значений знака «Они» добавляются каузальные матрицы остальных агентов планирования (шаг 9). **function** *GROUND*(*T*) :

1. $agent = T.agent$
2. $I_{sign} = Sign(I)$
3. $.They_{sign} = Sign(They)$.
4. **for** *sj* **in** subjects:
5. $sj = Sign(sj)$
6. **if** $agent = sj$ **then**
7. $I_{sign}.addfeature(sj)$
8. **else:** $They_{sign}.connect(sj)$
9. $z_{sj} = Z_m(sj)$
10. **for** *ob* **in** objects:
11. $ob = Sign(ob)$
12. $z_{ob} = Z_m(ob)$
13. **for** *role* **in** roles:
14. $role = Sign(role)$
15. $z_r = Z_m(r)$
16. $z_r.addfeature(z_{ob})$
17. **for** *pr* **in** predicates:
18. $pr = Sign(pr)$
19. $z_{pr} = Z(pr)$
20. $z_{pr}.addfeature(z_r)$
21. **for** *A* **in** actions:
22. $A = Sign(A)$
23. $z_A = Z(A)$
24. $z_A.addfeature(z_{pr})$
25. $z_{start}^a, z_{goal}^a := Sit(start, goal)$

Листинг 1. Формирование знаков по задаче планирования

Добавление каузальных матриц в сети знаков происходит с помощью функции «add feature», которая создает новый столбец в каузальной матрице знака с ссылкой на добавляемый знак. Далее формируются знаки и каузальные матрицы на сети значений для объектов задачи с помощью описания объектов в домене планирования (шаги 11-13). На следующем шаге алгоритм означивания создает знаки ролей объектов и связывает значения знаков ролей с соответствующими знаками объектов (шаги 14-17). После этого формируются знаки предикатов, в каузальные матрицы значений которых включаются ссылки на знаки ролей объектов, участвующих в них (шаги 18-21).

Заключительным шагом является создание знаков и процедурных каузальных матриц действий задачи (шаги 22-25). Ссылки на знаки ролей в процедурных каузальных матрицах частично заменяются на ссылки на знаки объектов и субъектов действия, что позволяет заранее создавать соответствующие блоку ограничений действия. Последним шагом алгоритма означивания является создание знаков и каузальных матриц на сети личностных смыслов начальной $z_{start}^a, z_{goal}^a := Sit(start, goal)$ и конечной ситуаций z_{goal}^a планирования.

4.2. Этап индивидуального планирования. Следующим этапом является этап индивидуального планирования, в котором агент создает все возможные планы по достижению целевой ситуации с помощью действий, включенных в личностные смыслы знаков «Я» и «Они». На шаге 6 (листинг 2) происходит назначение каузальной матрицы z_{sig} узлом сети личностных смыслов, который описывает целевую ситуацию, на шаге 7 происходит назначение каузальной матрицы z_{start} узлом сети личностных смыслов, который описывает первичную ситуацию. После этого происходит вызов рекурсивной функции MAP_ITERATION, которая возвращает список всех построенных планов.

Функция рекурсивного поиска планов начинается со сравнения шага рекурсии с максимальным числом итераций i , которое является внешним параметром и служит для ограничения глубины рекурсии. Если максимальное число итераций i_{max} было выполнено, а конечная ситуация не была достигнута, то поиск останавливается и множество планов формируется из уже найденных планов. Далее происходит поиск прецедентов достижения текущей ситуации z_{cur} из целевой z_{start} . Если была найдена процедурная каузальная матрица, в эффекты которой входят знаки текущей ситуации, а в условия знаки целевой ситуации, то она добавляется в список прецедентов действий $A_{precedences}$.

1. **for** agent in agents:
2. $T_{agent} = T, D$
3. $W_{agent} := GROUND(T_{agent})$
4. $Plan := MAPSEARCH(W_{agent})$
5. **function** $MAPSEARCH(W_{agent})$
6. $z_{cur} := z_{goal}^a$
7. $z_{start} := z_{start}^a$
8. $Plans := MAPITERATION(z_{cur}, z_{start}, \emptyset, 0)$
9. $\{Plan_0, Plan_1, \dots\} = SORT(Plans)$
10. **return** $Plan_0$
11. **function** $MAPITERATION(z_{cur}, z_{start}, Plan_{cur}, i)$
12. **if** $i > i_{max}$ **then**
13. **return** \emptyset
14. $A_{precedences} = Z(W_{agent})$
15. $Act_{chains} = getsitsigns(z_{cur})$
16. **for** chain in Act_{chains} :
17. $A_{signif} = getactions(chain)$
18. **for** z_{signif} in A_{signif} :
19. $Ch = openaction(z_{signif})$
20. $P = generatemeanings(Ch, agents)$
21. $checked = activity(z_{cur}, P, A_{precedences})$
22. $A_{cand} = metaactivity(checked)$
23. $exp_{cand} = exp(agents, A_{cand})$
24. **for** A, ag in exp_{cand} :
25. $z_{cur+1} = Sit(z_{cur}, A)$
26. $plan.append(A, ag)$
27. **if** $z_{cur+1} \in z_{start}$ **then**
28. $F_{plans}.append(plan)$
29. **else:** $Plans := MAPITERATION(z_{cur+1}, z_{start}, plan, i+1)$

Листинг 2. Основные функции алгоритма планирования

На шаге 17 листинга 2 происходит получение всех процедурных каузальных матриц A_{signif} . На 18-22 шагах происходит создание (шаги 18-19) и означивание (шаг 20) возможных процедурных каузальных матриц P на сети личностных смыслов агента, среди которых выбираются применимые в текущей ситуации A_{cand} . На шаге 23 отбираются каузальные матрицы exp_{cand} , которые присутствуют в опыте планирования. На 24-28 шагах происходит создание следующей ситуации z_{cur+1} для каждой из оставшихся процедурных матриц. Если следующая ситуация является целевой ситуацией z_{start} , то полученный план действий добавляется в список конечных планов F_{plans} , если нет, то происходит рекурсивный вызов функции поиска планов в шаге 29.

4.3. *Этап согласования.* Процесс согласования планов агентами коалиции происходит в три шага. Первым является шаг выбора плана каждым из агентов, в результате у агента остается только один план из множества всех доступных планов, за который он будет голосовать. Далее следует шаг выбора способа коммуникации между агентами и создание сообщения для других агентов, на этом шаге агент преобразует оставшийся план в текстовое сообщение. Последним является шаг проведения аукциона, по итогу которого агенты получают финальный план действий. Аукцион производится на сервере коммуникации агентов, который является централизованной системой связи всех агентов.

На первом шаге происходят следующие действия:

1. $shortestplans = \min(len(plans))$
2. $longest = \max(followers(shortestplans))$
3. $smallestagents = \min(agents(longest))$
4. $goodplans = includeI(shortestplans)$
5. $thebestplans = random(goodplans)$

Действие 1 позволяет выбрать среди всех планов планы наименьшей длины, действие 2 выбирает те планы, в которых последовательность подряд идущих действий агентов максимальна. Применение действия 2 обосновано уменьшением нагрузки на коммуникационную сеть при информировании следующего агента плана о потребности начать предписанные ему действия. Действие 3 позволяет выбрать те планы, в которых фигурирует наименьшее количество агентов, действие 4 выбирает из оставшихся планов те планы, в которых фигурирует планирующий агент. Действие 5 применяется только в тех случаях, когда остался не единственный план, полученный после выполнения действия 4. После этого происходит выбор типа соединения с другими агентами кооперации, вы-

бирается способ соединения с помощью процедурной каузальной матрицы знака «Проинформировать» (рисунок 5).

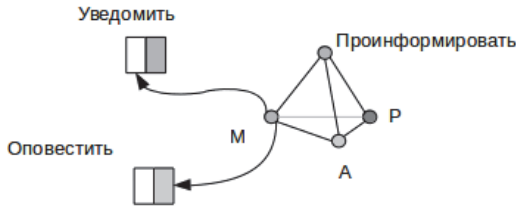


Рис. 5. Знак «Проинформировать»

4.4. *Этап сохранения опыта.* Следующим этапом является сохранения опыта агентов. Агент удаляет все матрицы ситуаций, кроме матриц начальной z_{start}^a и конечной ситуаций z_{start} , удаляет все процедурные каузальные матрицы, не вошедшие в план, например матрицы действий, которые включены в другие планы агента и отвергнуты на этапе согласования планов. Далее агент создает знак действия, чья каузальная матрица описывает возможность достижения конечной ситуации из начальной (рисунок 6) и сохраняет оставшиеся знаки. В образы знака действия, обозначающего опыт агента, входит каузальная матрица, содержащая ссылки на знаки всех действий, которые составляют в конечный план. В смыслы знака действия входит каузальная матрица, чьи условия содержат ссылку на z_{start}^a , а эффекты ссылку на z_{start} .

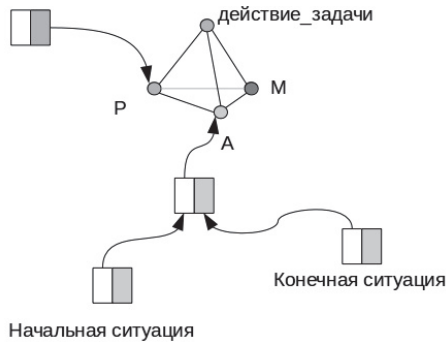


Рис. 6. Знак сохраненного плана выполнения задачи

При решении последующих схожих задач агент способен использовать опыт предыдущих прецедентов a_{exp} в качестве действия, в таком случае план будет выглядеть:

$$P(I) := a_1(I), a_2(a_{agent_2}), a_{exp}(\emptyset),$$

a_1, a_2 — действия агентов I и $агент_2$ соответственно, пустое множество обозначает отсутствие конкретного агента-исполнителя для действия, обозначающего прецедент планирования.

5. Экспериментальное исследование. В рамках демонстрации особенностей применения знакового подхода к решению задачи распределения ролей были проведены экспериментальные исследования, в которых рассмотрены решения задач планирования «Мир блоков» и «Логистика». На каждом шаге итерации процесса планирования возникают варианты выбора агента, который будет совершать требуемое действие, что приводит к значительному увеличению числа построенных планов. Далее представлен пример решения проблемы выбора общего плана действий в задаче «Мир блоков» в экспериментах 1-3 и задаче «Логистика» в экспериментах 4-6.

Домен планирования задачи «Мир блоков» состоит из описания действий: «Поднять», «Положить», «Состыковать», «Снять» и описания предикатов «На», «На столе», «Пустой», «Актuator пуст», «Тип блока». Задача планирования состоит из описания блоков, размеров блоков, агентов, начального и конечного положения блоков и актуаторов, ограничений на деятельность агентов. Ограничения состоят из предикатов, истинных для конкретных агентов планирования: Агент1: <размер блока>: большой блок, <размер блока>: средний блок, Агент2: <размер блока>: средний блок, <размер блока>: маленький блок и так далее.

В эксперименте 1 участвуют три агента планирования, каждый из которых может взаимодействовать с двумя блоками. Всего используется три вида блоков, в количестве двух блоков каждого вида. Начальная ситуация планирования включает 6 блоков, лежащих на столе, а конечная ситуация является описанием башни из блоков, которую необходимо построить агентам.

В процессе планирования каждый из агентов находит все 32 возможных плана с наименьшей длиной равной 10. Среди построенных планов выбираются планы наименьшей длины и планы, в которых агенты совершают наибольшее количество последовательных действий. Следующим шагом производится сортировка планов по количеству задействованных агентов и выбираются планы с минимальным числом агентов. Среди оставшихся планов агенты выбирают планы, в которых они являются субъектами деятельности. Далее агенты используют каузальную матрицу знака «Проинформировать» для получения матрицы знака «Оповестить» либо матрицы знака «Уведомить». Исследуемая задача планирования поддерживает работу трех агентов, из-за чего выбирается матрица знака «Оповестить» и добавляется к конечному плану каждого из агентов. Выбор матрицы «Оповестить» запускает процедуру формирования текстового сообщения для уведомления всех агентов о наличии построенного плана действий. Далее это сообщение отсылается на сервер коммуникации агентов и включается в словарь построенных планов, в котором ключами к словарю являются планы агентов, а значе-

ниями — число агентов, построивших такой же план. План, который удовлетворял наибольшее число агентов, признается окончательным.

Каждый из агентов сохраняет прецедент достижения целевой ситуации в виде знака действия, применимого в задачах с такими же ограничениями (рисунок 7). Каузальная матрица на сети личностных смыслов созданного знака действия содержит ссылку на каузальную матрицу знака целевой ситуации в левой части матрицы и ссылку на каузальную матрицу знака первичной ситуации в правой части матрицы. Каузальная матрица целевой ситуации задачи эксперимента 1 состоит из ссылок на знак «На-столе», который связан со всеми знаками блоков задачи, ссылки на знаки размеров блоков, знака «Актуатор-пуст», связанного со знаками агентов задачи и знака «Пустой», связанного со знаками блоков задачи. Каузальная матрица первичной ситуации отличается от каузальной матрицы целевой наличием знака «На», связанного со всеми блоками задачи и несущего смысловую нагрузку наличия башни из блоков, в которой с верхним блоком связан знак «Пустой», а с нижним - знак «На-столе». В образы знака действия входит каузальная матрица, в столбец условий которой входят ссылки на знаки всех действий, выполненных агентами по достижению целевой ситуации планирования.

В эксперименте 2 используется опыт построения планов агентами из эксперимента 1 при повторном решении задачи эксперимента 1. Каждый из агентов строит план длиною в два действия, используя действие, обозначающее опыт нахождения плана первого эксперимента и добавив действие согласования построенных планов.

$$P(A_1) := \langle a_{\text{exp}}(\emptyset), \text{notify}(A_1) \rangle$$

$$P(A_1) := \langle a_{\text{exp}}(\emptyset), \text{notify}(A_1) \rangle$$

$$P(\text{агент}_1) := a_{\text{exp}}(\emptyset), \text{Оповестить}(\text{агент}_1);$$

$$P(\text{агент}_2) := a_{\text{exp}}(\emptyset), \text{Оповестить}(\text{агент}_2);$$

$$P(\text{агент}_3) := a_{\text{exp}}(\emptyset), \text{Оповестить}(\text{агент}_3).$$

В эксперименте 3 задача эксперимента 1 расширяется с помощью добавления двух больших блоков в вершину башни и изменяется порядок блоков при построении башни. На первой итерации планирования агенты активируют матрицы означенных действий, сохраненных в рамках первого эксперимента. Полученные матрицы используются агентами при разрешении неоднозначности выбора действия, позволяя агенту выбирать те действия, которые составляют сохраненные прецеденты. При решении задачи в эксперименте 1 агент совершал действия «Поднять блок g» и «Состыковать блок g и блок e», в эксперименте 3 возникла неопределенность выбора агента для манипуляций с блоком «g», которая была решена в пользу агента уже совершавшего действия с этим блоком в эксперименте 1.

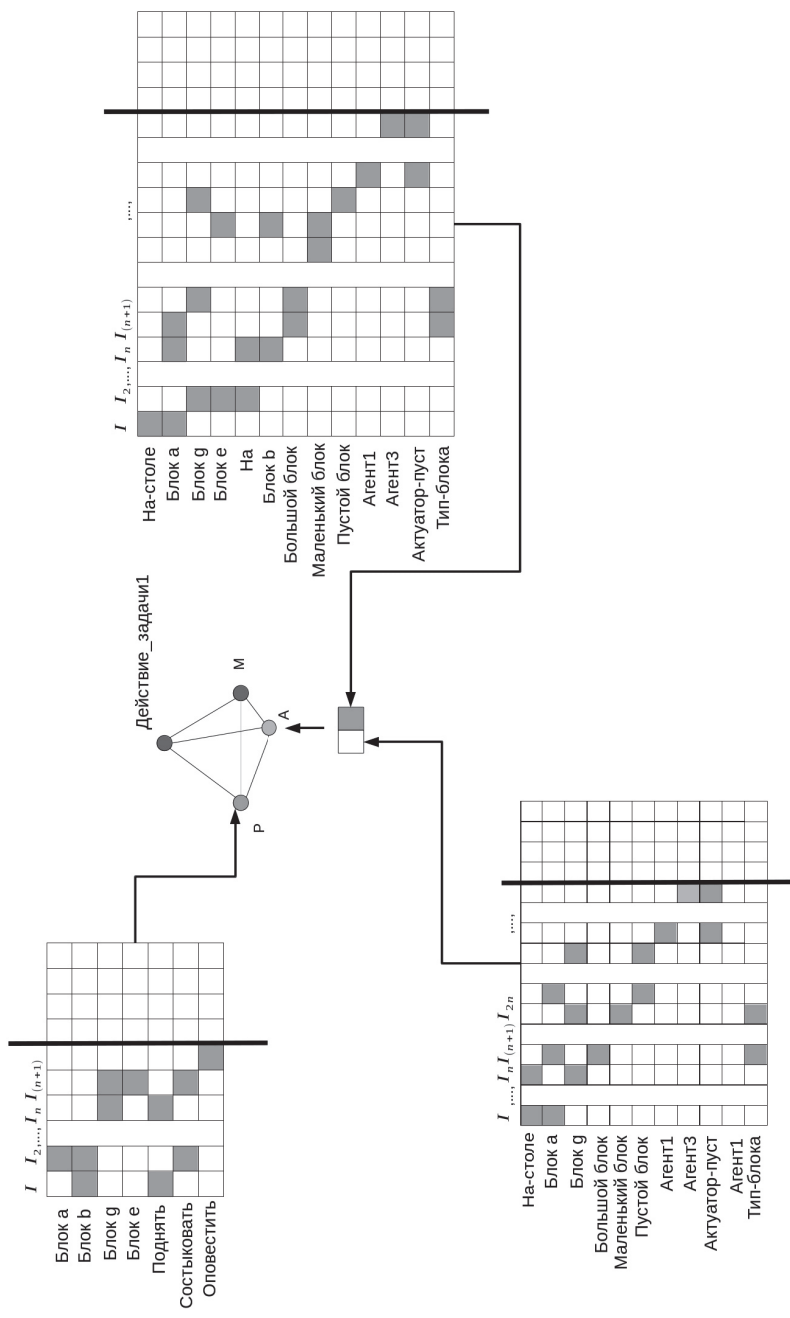


Рис. 7. Знак опыта планирования в задаче «Мир блоков»

В таблице 1 представлены условия экспериментов 1 — 3. КА — количество агентов, КТ — количество типов блоков, КТА — количество типов блоков, с которыми может взаимодействовать агент, КБ — количество блоков. В таблице 2 описаны результаты экспериментов 1-3. ДП — длина согласованного плана агентов, КЗ — количество знаков в картинах мира агентов. ВП — время, затраченное агентами для поиска всех планов достижения целевой ситуации, ИО — использование опыта агентами, КП — количество памяти, затраченное агентами на решение задачи.

Эксперименты 4-6 выполнены с задачей «Логистика», домен и задача планирования которой имеет схожее описание с задачей «Мир блоков». Отличием является наличие различных типов агентов (грузовик и самолет), каждый из которых имеет свой набор доступных действий, недоступный агентам другого типа. Домен планирования задачи «Логистика» состоит из описания действий: «Загрузить грузовик», «Разгрузить грузовик», «Перевезти грузовик», «Загрузить самолёт», «Разгрузить самолёт», «Перелёт самолёта» и описания предикатов «Аэропорт-прилёт», «Аэропорт-вылет», «Содержит», «Пустой», «Груз», «Дислокация», «Целевая-локация», «Начальная локация» и т.д. Задача планирования описывает первичные и целевые местоположения грузов и средств передвижения, а также ограничения на вместительность средств передвижения.

Таблица 1. Условия экспериментов 1-3

#эксп.	КА	КТ	КТА	КБ
1	3	3	2	6
2	3	3	2	6
3	3	3	2	8

Таблица 2. Результаты экспериментов 1-3

#эксп.	ДП	КЗ	ВП	ИО		КП
1	11	35	8940	нет		38,6
2	2	35	17	да		33,3
3	15	40	6400	да		39,9

В эксперименте 4 рассматривается задача перемещения двумя грузовиками разной грузоподъемности четырех различных грузов в аэропорт. После перемещения грузов в аэропорт агент-самолет перевозит их в аэропорт другого города. В эксперименте 5 рассматривается задача, в которой используется два вида грузов, которые находятся в различных местах двух разных городов. В каждом городе находятся грузовики различной грузоподъемности, которые должны доставлять грузы до аэропорта или до точек дислокации грузов. Между городами осуществлено воздушное сообщение. В эксперименте 6 решается задача доставки грузов трех видов

в аэропорт грузовиками, каждый из которых может быть загружен только двумя видами грузов. С помощью алгоритма multiMAP были найдены планы по перемещению грузов в целевое место назначения.

В таблице 3 представлены условия экспериментов 4-6. КАГ — количество агентов типа грузовик, КАС — количество агентов типа самолет, КГ — количество грузов, КТГ — количество типов грузов.

В таблице 4 описаны результаты экспериментов 4-6. ДП — длина согласованного плана агентов, ВП — время, затраченное агентами для поиска всех планов достижения целевой ситуации, КП — количество памяти, затраченное агентами на решение задачи.

На основе полученных данных были построены графики на рисунке 8.

Таблица 3. Условия экспериментов 4-6

#эксп.	КАГ	КАС	КГ	КТГ
1	2	1	4	2
2	4	1	4	2
3	3	0	6	3

Таблица 4. Результаты экспериментов 4-6

#эксп.	ДП	ВП	КП
1	40	4040	62,16
2	184	16000	180,4
3	48	5020	69,5

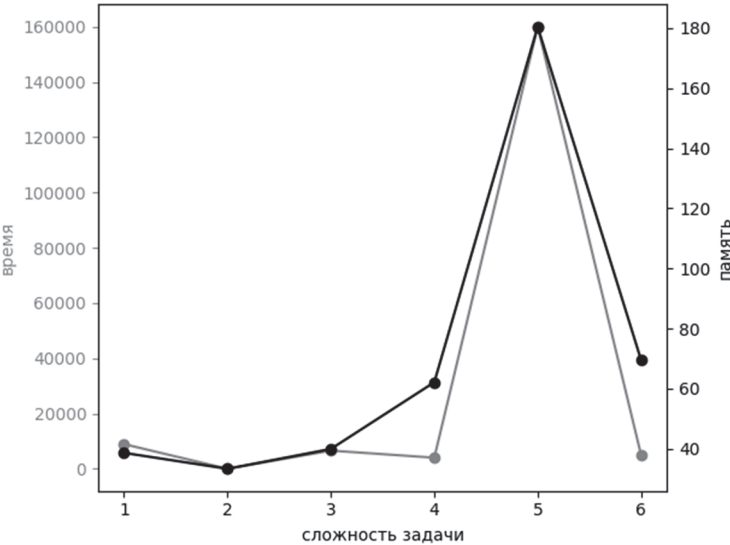


Рис. 8. Графики зависимости используемой памяти и времени подсчета планов относительно сложности задачи

Согласно данным, представленным на рисунке 8, можно сделать вывод, что с увеличением числа субъектов и объектов деятельности в алгоритме планирования наблюдается значительный рост потребления ресурсов, что усложняет процесс когнитивной оценки ситуации. Несмотря на длительность процесса построения оптимального плана решения в многоагентных задачах, алгоритм, основанный на знаковом подходе, предоставляет возможность заранее распределить роли агентов и предотвратить ситуации, в которых агенты одновременно пытаются выполнить действия с одним объектом. Агенты со знаковой картиной мира используют накопленный опыт для разработки планов действий. Подход с использованием опыта планирования позволяет значительно уменьшить потребление вычислительных ресурсов агента и ускорить процесс построения планов.

6. Заключение. В работе представлен знаковый подход к решению задачи коллективного планирования поведения и распределения ролей в коалиции. Рассмотренные эксперименты показывают, что проблема распределения ролей в коллективе является основополагающей проблемой многоагентного планирования, решение которой требует от агента серьезных временных и вычислительных затрат. Знаковый подход к планированию позволяет использовать опыт агентов, что значительно уменьшает ресурсоемкость задачи, одновременно позволяя унифицировать алгоритм добавления агентов в коллектив при наличии информации о возможностях агента. В будущих этапах разработки подхода планируется экспериментально описать проблему распределения ролей агентов с помощью взаимодействия физических роботов в реальном мире и в среде эмуляции Gazebo.

Литература

1. *Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В.* Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 49–62.
2. *Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В.* Управление поведением как функция сознания. II. Синтез плана поведения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 6. С. 47–61.
3. *Леонтьев А.Н.* Деятельность. Сознание. Личность: изд. 2-е. // М.: Политиздат. 1977. 304 с.
4. *Макаров Д.А., Панов А.И., Яковлев К.С.* Архитектура многоуровневой интеллектуальной системы управления беспилотными летательными аппаратами // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 3. С. 18–33.
5. *Panov A.I.* Behavior Planning of Intelligent Agent with Sign World Model // Biol. Inspired Cogn. Archit. 2017. vol. 19. pp. 21–31.
6. *Slaney J., Thiébaux S.* Blocks World revisited // Artificial Intelligence. 2001. vol. 125. no. 1–2. pp. 119–153.
7. The Foundation for Intelligent Physical Agents – FIPA. URL: <http://www.fipa.org> (дата обращения: 10.12.2017).

8. *Городецкий В.И. и др.* Прикладные многоагентные системы группового управления // Искусственный интеллект и принятие решений. 2009. № 2. С. 3–24.
9. *Gal Y. et al.* Agent decision-making in open mixed networks // Artificial Intelligence. 2010. vol. 174. no. 18. pp. 1460–1480.
10. *Primeau N. et al.* Improving task allocation in risk-aware robotic sensor networks via auction protocol selection // 2016 IEEE 20th Jubilee International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). 2016. pp. 21–26.
11. *Холодкова А.В.* Применение агентов в модели договорных сетей // Системы обработки информации. 2012. № 4(102). С. 142–145.
12. *Lorini E., Verdicchio M.* Towards a Logical Model of Social Agreement for Agent Societies // Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems V. 2010. pp. 147–162.
13. *Sabater J., Sierra C.* Review on Computational Trust and Reputation Models // Artificial intelligence review. 2005. vol. 24. no. 1. pp. 33–60.
14. *Huynh T.D., Jennings N.R., Shadbolt N.R.* An integrated trust and reputation model for open multi-agent systems // Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2006. vol. 13. no. 2. pp. 119–154.
15. *Бурдун И.Е., Бубин А.Р.* Исследования и разработки в области мобильной робототехники стайного применения (краткий технический обзор зарубежных публикаций) // Морские информационно-управляющие системы. 2012. № 1. С. 46–56.
16. *Granatyr J. et al.* Trust and Reputation Models for Multiagent Systems // ACM Comput. Surv. 2015. vol. 48. no. 2. pp. 1–42.
17. *Serrano E., Rovatsos M., Botia J.* A qualitative reputation system for multiagent systems with protocol-based communication // Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2012. vol. 1. pp. 307–314.
18. *Jakubův J., Tožička J., Komenda A.* Multiagent Planning by Plan Set Intersection and Plan Verification // Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence. SCITEPRESS - Science and Technology Publications. 2015. pp. 173–182.
19. *Kovacs D.L.* A Multi-Agent Extension of PDDL3 // ICAPS 2012 Proceedings of the 3rd Workshop on the International Planning Competition (WS-IPC 2012). 2012. pp. 19–37.
20. *Fikes R.E., Nilsson N.J.* STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving // Artificial Intelligence. 1971. vol. 2. no. 3–4. pp. 189–208.
21. *Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В.* Открытые сети агентов // Труды СПИИРАН. 2007. № 4. С. 11–35.
22. *Городецкий В.И., Карсаев О.В.* Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. Т. 187. № 2. С. 234–247.
23. *Kiselev G.A., Panov A.I.* Synthesis of the Behavior Plan for Group of Robots with Sign Based World Model // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2017. pp. 83–94.
24. *Bazhenkov N., Korepanov V.* Double Best Response as a Network Stability Concept // 7th International Conference on ETwork Games, COntrol and OPtimization (NetGCoop). 2014. pp. 201–207.
25. *Корепанов В.О., Новиков Д.А.* Метод рефлексивных разбиений в моделях группового поведения и управления // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 21–32.
26. *Gerevini A.E., Long D.* Plan Constraints and Preferences in PDDL3 // Technical Report. 2005. 12 p.

Киселёв Глеб Андреевич — программист лаборатории динамических интеллектуальных систем института системного анализа, Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН). Область научных

интересов: многоагентное планирование, целеполагание, когнитивные способы представления знаний. Число научных публикаций — 3. kiselev@isa.ru; пр-т 60-летия Октября, 9, Москва, 117312; р.т.: +7(906)799-3329.

Панов Александр Игоревич — старший научный сотрудник лаборатории динамических интеллектуальных систем института системного анализа, Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), доцент базовая кафедры интеллектуальных технологий системного анализа и управления федерального исследовательского центра "Информатика и управление" Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН) факультета компьютерных наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Область научных интересов: искусственный интеллект, групповая робототехника, планирование, семиотика, моделирование когнитивных функций. Число научных публикаций — 51. pan@isa.ru; пр-т 60-летия Октября, 9, Москва, 117312; р.т.: +79161445255.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-37-60055-мол_а_дк).

G.A. KISELEV, A.I. PANOV
**SIGN-BASED APPROACH TO THE TASK OF ROLE
 DISTRIBUTION IN THE COALITION OF COGNITIVE AGENTS**

Kiselev G.A., Panov A.I. Sign-based Approach to the Task of Role Distribution in the Coalition of Cognitive Agents.

Abstract. In this paper we consider the problem of the role distribution during the construction of a general plan of actions in the coalition of cognitive agents. Cognitive agents realize the basic functions of an intelligent agent using models of human cognitive functions. As a psychological basis for constructing models of cognitive functions, the theory of activity and the formalization of sign-based world model were used. The paper presents an original method for roles distribution - the MultiMAP algorithm, based on the sign-based method of agent's behavior planning. The main features of the described approach are presented, including ways of representing the agent's knowledge of himself and other agents, methods of sign communication and preserving the experience of cooperation with other agents. Model experiments are described that demonstrate the main advantages of the approach presented and some of the shortcomings to be eliminated in future work.

Keywords: cognitive agents, coalition, planning, role distribution, sign, sign-based world model, activity theory.

Kiselev Gleb Andreevich — programmer of dynamic intelligent systems laboratory of the Institute of System Analysis Federal research center "Computer science and control" of Russian academy of science (FRC CSC RAS). Research interests: multi-agent planning, goal-setting, cognitive types of knowledge representation. The number of publications — 3. kiselev@isa.ru; 9, pr. 60-letiya Otkryabrya, Moscow, 117312, Russia; office phone: +7(906)799-3329.

Panov Aleksandr Igorevich — Ph.D., senior researcher of dynamic intelligent systems laboratory of the Institute of System Analysis Federal research center "Computer science and control" of Russian academy of science (FRC CSC RAS), associate professor of intelligent technologies in system analysis and management department with Federal Research Center of Computer Science and Control of Russian Academy of Sciences of faculty of Computer Science, National Research University Higher School of Economics (NRU HSE). Research interests: machine learning, pattern recognition, cognitive computer modeling, multiagent systems. The number of publications — 51. pan@isa.ru; 9, pr. 60-letiya Otkryabrya, Moscow, 117312, Russia; office phone: +79161445255.

Acknowledgements. This research is supported by RFBR (grant 16-37-60055-mol_a_dk).

References

1. Osipov G.S., Panov A.I., Chudova N.V. [Behavior control as a function of consciousness. I. World model and goal setting]. *Izvestija Rossijskij akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija – Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2014. vol. 4. pp. 517–529. (In Russ.).
2. Osipov G.S., Panov A.I., Chudova N.V. [Behavior Control as a Function of Consciousness. II. Synthesis of a Behavior Plan]. *Izvestija Rossijskij akademii nauk. Teorija i sistemy upravlenija – Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015. vol. 6. pp. 882–896. (In Russ.).
3. Leont'ev A.N. *Dejatel'nost'. Soznanie. Lichnost': Izd. 2-e.* [The Development of Mind: 2nd ed.]. M.: Politizdat. 1977. 304 p. (In Russ.).
4. Emel'yanov S. et al. [Multilayer cognitive architecture for UAV control]. *Iskusstvennyj intellekt i prinjatje reshenij – Artificial Intelligence and Decision Making*. 2016. vol. 39. pp. 58–72. (In Russ.).
5. Panov A.I. Behavior Planning of Intelligent Agent with Sign World Model *Biol. Inspired Cogn. Archit.* 2017. vol. 19. pp. 21–31.

6. Slaney J., Thiébaux S. Blocks World revisited. *Artificial Intelligence*. 2001. vol. 125. no. 1–2. pp. 119–153.
7. The Foundation for Intelligent Physical Agents – FIPA. Available at: <http://www.fipa.org> (access: 10.12.2017).
8. Gorodetsky V.I. et al. [Applied multiagent sytems for group control]. *Iskusstvennyy intellekt i prinjatie reshenij – Artificial Intelligence and Decision Making*. 2009. vol. 2. pp. 3–34. (In Russ.).
9. Gal Y. et al. Agent decision-making in open mixed networks. *Artificial Intelligence*. 2010. vol. 174. no. 18. pp. 1460–1480.
10. Primeau N. et al. Improving task allocation in risk-aware robotic sensor networks via auction protocol selection. 2016 IEEE 20th Jubilee International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). 2016. pp. 21–26.
11. Holodkova A.V. [Application of agents is in model of contractual network]. *Sistemy obrabotki informacii – Information Processing Systems*. 2012. № 4(102). pp. 142–145. (In Russ.).
12. Lorini E., Verdicchio M. Towards a Logical Model of Social Agreement for Agent Societies. Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Agent Systems V. 2010. pp. 147–162.
13. Sabater J., Sierra C. Review on Computational Trust and Reputation Models. *Artificial intelligence review*. 2005. vol. 24. no. 1. pp. 33–60.
14. Huynh T.D., Jennings N.R., Shadbolt N.R. An integrated trust and reputation model for open multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multiagent Systems*. 2006. vol. 13. no. 2. pp. 119–154.
15. Burdun I.Y., Bubín A.R. [Research and Development in the Field of Mobile Robotics for Swarming Applications (a brief review of publications)]. *Morskie informacjonno-upravljajushhie sistemy – Marine Information and Control Systems*. 2012. vol. 1. pp. 46–56. (In Russ.).
16. Granatyr J. et al. Trust and Reputation Models for Multiagent Systems. *ACM Comput. Surv.* 2015. vol. 48. no. 2. pp. 1–42.
17. Serrano E., Rovatsos M., Botia J. A qualitative reputation system for multiagent systems with protocol-based communication. Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2012. vol. 1. pp. 307–314.
18. Jakubův J., Tožička J., Komenda A. Multiagent Planning by Plan Set Intersection and Plan Verification. Proceedings of the International Conference on Agents and Artificial Intelligence. 2015. pp. 173–182.
19. Kovacs D.L. A Multi-Agent Extension of PDDL3. ICAPS 2012 Proceedings of the 3rd Workshop on the International Planning Competition (WS-IPC 2012). 2012. pp. 19–37.
20. Fikes R.E., Nilsson N.J. STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence*. 1971. vol. 2. no. 3–4. pp. 189–208.
21. Gorodetsky V.I., Karsaev O.V., Samoilov V.V., Serebryakov S.V. [Open networks of agents]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2007. vol. 4. pp. 11–35. (In Russ.).
22. Gorodetsky V.I., Karsaev O.V. [Distributed Surveillance System Based on Self-Organized Collective Behavior of Small Satellite Cluster]. *Izvestija JuFU. Tehniceskie nauki – Izvestia SFU. Technical sciences*. 2017. vol. 187. no. 2. pp. 234–247. (In Russ.).
23. Kiselev G.A., Panov A.I. Synthesis of the Behavior Plan for Group of Robots with Sign Based World Model. International Conference on Interactive Collaborative Robotics. 2017. pp. 83–94.
24. Bazenkov N., Korepanov V. Double Best Response as a Network Stability Concept. 2014 7th International Conference on NETwork Games, CONTROL and OPTimization (NetGCoop). pp. 201–207.
25. Korepanov V.O., Novikov D.A. [Method of reflexive partitions in models of group behavior and control]. *Problemy upravlenija – Control problems*. 2011. vol. 1. pp. 21–32. (In Russ.).
26. Gerevini A.E., Long D. Plan Constraints and Preferences in PDDL3. Technical Report. 2005. 12 p.