

УДК 004.896

МОДЕЛЬ КОМАНДНОЙ РАБОТЫ АГЕНТОВ С BDI АРХИТЕКТУРОЙ¹

А.А. Кулинич (kulinich@ipu.ru)

Институт проблем управления РАН, Москва

Предложена математическая модель командной работы агентов, включающая модели знаковой среды функционирования и BDI архитектуры агентов. Сформулированы условия кооперации агентов для достижения общей цели.

Ключевые слова: Роботы, агенты, BDI архитектура, команда, кооперация.

Введение

Интерес к принципам организации командной работы существует в рамках организационных систем, исследующих команды людей, также в технических и информационных системах. Интерес этот видимо, вызван тем, что 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 этой работе рассмотрена математическая модель формирования и функционирования команды искусственных интеллектуальных агентов с BDI архитектурой в качественной (знаковой) среде функционирования.

1. Модели командной работы в социальных, организационных, технических и информационных системах

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 необходимо учитывать не только рациональность поведения членов команды, но и иррациональность их

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

поведения. Считается, что каждая команда является группой людей, но не каждая группа является командой. Термин команда употребляют в тех случаях, когда 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.

Математические модели формирования и функционирования команд в организационных системах рассмотрены в работе [Новиков, 2008]. Здесь под командой понимается объединение людей (персонала организации), обладающих общими интересами и осуществляющих совместную деятельность для достижения индивидуальных и общих целей. Команда исследуется как система, характеристики которой как целостного объекта (устойчивость, эффективность и др.) могут быть выражены через характеристики (информированность, рациональность, и др.) элементов этой системы – членов команды, а также через механизмы их взаимодействия. Результаты, полученные в этой работе с помощью строгих теоретических и имитационных моделей могут быть полезны при формировании команд различного назначения в различных организациях.

Теоретические и практические вопросы создания команд технических устройств (роботов) с системных позиций были рассмотрены в работе [Каляев и др. 2009]. Здесь группа роботов R_i , $i=1, \dots, N$, каждый из которых характеризуется вектором состояний $R=(r_1, \dots, r_n)$ (значения его свойств) помещен в среду E , которая также характеризуется вектором состояния, $E=(e_1, \dots, e_n)$. Пара векторов $S_c=\langle R, E \rangle$ характеризует состояние системы «роботы – среда». Каждый робот может выполнять действия A , изменяющие состояние системы «роботы – среда». Действия роботов направлены на то, чтобы изменить текущее состояние системы S_c в некоторое желаемое состояние S_c^f и описывается системой дифференциальных уравнений. Ставится задача определения совместных действий роботов, позволяющих достичь поставленной цели S_c^f . Эта задача определяется как задача группового управления (управления группой роботов), решение которой – это векторы действий всех роботов $A_c(t)$, обеспечивающие экстремум функционала, характеризующего качество 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 от центра, что повышает ее устойчивость к его отказам и отказам отдельных агентов.

Дальнейшее повышение автономности роботов связано с повышением их интеллектуальности. Интеллектуального агента можно определить

перечислением его свойств (способностей). Это: 1) *Автономность* – способность действовать самостоятельно; 2) *Реактивность* – способность реагировать на изменение состояний 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 системах реализуются, как правило, достаточно просто, но третье и четвертое свойства, которые по сути определяет группу агентов как команду, требует исследований, которые могут опираться как на социально-психологические исследования малых групп, так и на математические модели команд, приведенных, например, в работе [Новиков, 2008].

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 (по сути в терминах ментальных состояний агентов) в работе [Wooldridge, 1992] 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 [Крипке, 1963]. 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 [Rao, 1995] 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 поддержки структуры взаимодействия команды агентов и достижения общей цели без внешнего вмешательства.

Вопросы командного поведения интеллектуальных агентов с BDI архитектурой исследовались в работе [Cohen, 1991]. 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. В теории общих планов [Grosz, 1996] 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.

Все перечисленные работы создали теоретический фундамент командного поведения искусственных интеллектуальных агентов.

В этой работе строится математическая модель функционирования команды агентов в терминах динамической системы [Каляева, и др. 2009], в которой агенты имеют BDI архитектуру и неполные знания о среде функционирования.

2. Математическая модель знаковой среды функционирования

Под средой функционирования агентов будем понимать «среду обитания» агентов, которая включает множество агентов $A=\{a_i\}$ и объектов $B=\{b_j\}$, обладающих определенными свойствами: множеством свойств (параметрами) $F=\{f_i\}$; автономностью; реактивностью; проактивностью и социальностью. Для каждого свойства каждого из объектов (агентов) этой среды определено упорядоченное множество их возможных значений, $Z=\{Z_i\}$, где $Z_i=\{z_{i1}, \dots, z_{iq}\}$, $z_{iq+1} \succ z_{iq}$ $q=0 \dots n-1$.

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

В среде функционирования агентов, объекты и агенты представлены в виде точек с координатами значений их свойств в пространстве SF , т.е. $A, B=(z_{1e}, \dots, z_{nq})$, где $(z_{1e}, \dots, z_{nq}) \in SF$.

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

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

Для построения модели агента с *BDI* архитектурой, среду функционирования будем представлять в виде качественной – знаковой модели этой среды. Такое представление основывается на качественном разбиении пространства состояний SF на вложенные подпространства $SS(d^H)$, определяющие классы состояний динамической системы. При этом каждое подпространство характеризуется тройкой: d^H – имя класса состояний, $SS(d^H) \subseteq SF$ – содержанием класса состояний, которое определяет его границы, $V(d^H) = \{a_1, \dots, b_1\}$ – объем класса состояний – это множество агентов и объектов, значение свойств которых принадлежат содержанию класса состояний, т.е. $a_1 = (z_{1e}, \dots, z_{nq})$, $b_1 = (z_{1e}, \dots, z_{nq}) \in SS(d^H)$.

В работах [Кулинич, 2013] описан способ разбиения пространства состояний на вложенные подпространства, который позволяет представить его в виде концептуального каркаса $KK^W = (\{SS(d^H)\}, \leq)$ – частично упорядоченного множества классов состояний, которое формально соответствует понятийной структуре (онтологии) среды функционирования. Кроме этого, определено соответствие $\varphi: (z_{1e}, \dots, z_{nq}) \rightarrow SS(d^H)$, однозначно связывающее значения свойств агентов с классом состояний, в котором они находятся [Кулинич, 2013].

Определение 3. Качественной знаковой средой функционирования будем называть концептуальный каркас $KK^W = (\{SS(d^H)\}, \leq)$ классов состояний, каждый элемент которого – знак представленный тройкой: $\langle d^H; SS(d^H); V(d^H) \rangle$ – имя, содержание и объем класса состояний.

Определение 4. Качественное состояние среды функционирования $Z^*(t)$ определяет вектор имен классов состояний, в которых находятся агенты и объекты. Т.е.

$$Z^*(t) = \varphi(z_{1e}, \dots, z_{1q}, \dots, z_{ne}, \dots, z_{nq}) = (d_1^{H1}, \dots, d_n^{Hn}) \quad (2)$$

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

3. Модель агента с *BDI* архитектурой в знаковой среде

В терминах предложенной знаковой модели среды функционирования представим элементы *BDI* (*Belief-Desire-Intention*) архитектуры агентов.

Убеждения агентов (*Belief*) – это его знания о среде функционирования, включающие две составляющие – $\langle BEL_i, W_i^{BEL} \rangle$.

Первая – это знания агента о среде функционирования формально представляются в виде частично упорядоченного множества классов состояний этой среды, доступных для этого агента:

$$BEL_i = (\{SS_i(d^H)\}, \leq) \subseteq KK^W.$$

Вторая составляющая убеждений – это знания о закономерностях среды функционирования, которые определяется как отображение:

$$W_i^{BEL}: \varphi(\times Z_{ji}) \rightarrow \varphi(\times Z_{ji}),$$

где $\times Z_i$ - векторы значений признаков агентов, $\varphi(\times Z_{ji}) = SS_{ji}(d^H) \in BEL_j$ - соответствие векторов значений признаков классам состояний среды функционирования, W_i^{BEL} - множество правил продукций (Если, То), отражающих закономерности среды функционирования.

Цели агентов (*Desire*) - это целевое состояние среды функционирования в виде вектора $G_i = (g_{i1}, \dots, g_{in})$, $g_{in} \in Z_i$, определяющего точку в пространстве *FS*. В терминах знаковой среды функционирования цель будем определять классом состояний, к которому эта цель принадлежит, т.е. тройкой: d^{Gi} - имя класса состояний цели; $SS(d^{Gi})$ - содержание ($\varphi: (G_i) \rightarrow SS(d^{Gi})$) и $V(d^{Gi})$ - объем класса цели.

Цель каждого агента в этом случае может быть представлена в виде вектора имен классов состояний среды функционирования, в которых должны находиться агенты или объекты.

$$DES_i = (d_1^{Gj}; d_2^{Gj}; \dots; d_n^{Gj})$$

Действия агентов (*Intention*). Состояние среды функционирования способны изменить агенты, изменяя значения собственных свойств или свойств объектов, при наличии у них ресурсов $U_i^R = (u_{i1}^R, \dots, u_{in}^R)$, $u_{in}^R \in Z_i$.

В среде функционирования KK^W ресурсы агента, представлены в виде множества имен классов состояний среды функционирования:

$$INT_i = \{d_i^{Uj}\},$$

где d_i^{Uj} - имя класса ресурсов, которое определяет его содержание $SS(d_i^{Uj})$, ($\varphi: (U_i^R) \rightarrow SS(d_i^{Uj})$) и объем класса ресурсов - $V(d_i^{Uj})$.

Считаем, что действия агента, направленные на достижение цели, возможны в рамках его убеждений - $BEL_i = \{SS_i(d^H), \leq\} \subseteq KK^W$. Это означает, что множество возможных действий агента $INT_i(t)$ должны принадлежать множеству его убеждений (знаний), т.е. $INT_i \subseteq BEL_i$.

Таким образом, все элементы *BDI* архитектуры агентов могут быть выражены в терминах знаков среды функционирования, определяющих классы возможных ее состояний следующим короткем:

$$\langle \langle BEL_i, W_i^{BEL} \rangle, DES_i, INT_i \rangle \quad (3)$$

4. Поведение агента в знаковой среде функционирования

Под поведением агента будем понимать его последовательные действия, направленные на достижение цели DES_i . Изменение состояния среды, *i*-м агентом осуществляется с учетом его знаний о среде W_i^{BEL} и может быть выражено системой логико-лингвистических уравнений:

$$W_i^{BEL}: (Z^*(t), INT_i^*) \rightarrow Z^*(t+1)$$

где W_i^{BEL} – знания i -го агента (система правил «Если, То»), $Z^*(t)$, – начальный вектор состояния среды, $INT_i^* \in \times_i INT_i$ – управление (действие агента), $Z^*(t+1)$ состояние среды после управления.

Формально поиск действия для достижения заданного вектора цели DES_i можно свести к решению обратной задачи, которая для знаковой среды функционирования запишется так:

$$INT_i^* = DES_i \circ W_i^{BEL}$$

где INT_i^* – действие агента позволяющее достичь цели DES_i , \circ – правило обратного вывода.

4.1. Возможность самостоятельного достижения цели агентом.

Критерием возможности достижения агентом собственной цели является наличие у агента ресурсов для ее достижения. То есть, решение обратной задачи INT_i^* , полученное агентом для достижения цели DES_i и множество его возможных действий INT_i должно содержать общие элементы.

Утверждение 1. Если пересечение множеств решений обратной задачи и возможных действий агента не пустое множество, $INT_i^* \cap INT_i \neq \emptyset$, то цель достижима агентом самостоятельно.

Действительно, если у агента есть необходимые ресурсы и знания для достижения поставленной цель, то он может эту цель достигнуть.

4.2. Возможность достижения цели в кооперации с другими агентами. Интерес представляют случаи, когда в векторе цели i -о агента есть элементы, не принадлежащие его системе убеждений BEL_i . В этом случае, цель может быть достигнута при условии кооперации i -о агента с другими агентами. Ситуация когда цель агента не может быть достигнута без кооперации с другими агентами записывается следующим образом:

$$\forall d_i^H \in DES_i \& \exists d_i^H \notin BEL_i.$$

4.3. Условия кооперации агентов в знаковой среде. Рассмотрим теперь условия кооперации агентов.

Условие 1. Агент j считается привлекательным для кооперации для агента i , если элемент его цели $d_i^H \notin BEL_i$ существует в системе убеждений (знаний) агента j , т.е. $d_i^H \in BEL_j$.

Согласно этому условию агент i для кооперации должен выбрать агента, который может достичь его цели. При этом, агент j может отказаться от кооперации, если цель агента i ему не интересна.

Условие 2. Агент j считается привлекательным для кооперации для агента i , если в его системе убеждений существуют элементы $d_i^H \in BEL_i$, которые является также элементами системы убеждений агента j , т.е. $d_i^H \in BEL_j$.

Это условие означает, что существует элемент d_i^H , содержащийся в пересечении систем убеждений этих агентов, т.е. если $\exists d_i^H \in BEL_i \cap BEL_j$.

Условие 3. Агент j и агент i считаются зависимыми по цели, если агент j является привлекательным для кооперации для агента i и агент j является привлекательным для агента i , т.е. если $d_i^{Hc} \in DES_j$ & $d_j^{Hc} \in DES_i$

Кооперация агентов, рассматриваемая в этой статье, заключается в изменении агентом j тех свойств агента i , которые он сам, в силу ограниченности его системы убеждений изменить не может.

Допущение 1. Агент j может изменить свойства только тех агентов или объектов, которые включены в объем $V(d_j^H)$ классов состояний его системы убеждений BEL_j . Т.е. $\exists (a_i \in A \vee b_i \in B) \in V(d_j^H) | d_j^H \in BEL_j$.

В связи с этим сформулируем еще одно условие кооперации агентов.

Условие 4. Агент j может изменить свойства агента i , если агент i включен в объем одного из возможных классов состояний агента j , т.е. $a_i \in V(d_j^H) | d_j^H \in BEL_j$.

Если выполняются все перечисленные условия, то кооперация агента i , если агент j возможна. Численный пример, приведенных выше теоретических построений приводится в работе [Кулинич, 2016].

5. Эксперимент и обсуждение

Предложенная модель командной работы агентов была проверена с помощью имитационной модели. Моделировалась командная работа четырех агентов, каждый из которых имел два свойства, значения которых определялись на интервале числовой оси. Был построен концептуальный каркас среды функционирования: выделены подпространства классов состояний, заданы их имена и объемы. В терминах имен классов состояний была определена BDI модель (3) каждого агента. Для проверки кооперативного взаимодействия агентам задавались цели, достичь которые они самостоятельно не могли. Для достижения таких целей, агенты обменивались информацией по разработанному протоколу и принимали решения о кооперации на основе условий предложенных в модели. Эксперименты показали, что агенты самостоятельно договаривались о кооперации для достижения цели, изменяя свои свойства и свойства других агентов. При проведении экспериментов считалось, что агенты всегда соглашались с предложениями о кооперации. Дальнейшие исследования предполагают моделирование социальных аспектов поведения агентов (например, отказ от кооперации из-за эгоистичного поведения агентов).

Заключение

Предложена математическая модель знаковой среды функционирования, BDI архитектуры агентов, представленная в терминах

этой среды и сформулированы условия командной работы агентов. Эксперименты подтверждают корректность предложенной модели.

Список литературы

- [Новиков, 2008] Новиков Д.А. Математические модели формирования и функционирования команд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 184 с.
- [Каляев и др., 2009] Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов / М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.-279 с.
- [Kripke, 1963] Kripke S. Semantic Analysis of Modal Logic. Zeitschrift fur Matematische Logik und Grundlagen der Matematik, No.9, 1963, pp. 67-96.
- [Cohen, 1991] Cohen P., Levesque H.J. Teamwork. Nous, 25(4), (1991) Special Issue on Cognitive Science and Artificial Intelligence, P. 487-512.
- [Grosz, 1996] Grosz B., Kraus S. Collaborative Plans for Complex Group Actions // Artificial Intelligence. – 1996. – №86. – P. 269–358.
- [Wooldridge, 1992] Wooldridge M. J. The Logical Modeling of Computational Multi-Agent Systems. PhD thesis. _Manchester. _1992.. 153 p.
- [Rao, 1995] 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.
- [Кулинич, 2014] Кулинич А.А. Концептуальные каркасы онтологий слабо структурированных предметных областей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. - № 4. - С. 31-41.
- [Кулинич, 2016] Кулинич А.А. Модель кооперации агентов в семиотической среде. Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: материалы VI международной научно-технической конференции (Минск, 18-20 февраля 2016 г.)/ под.ред. Голенкова В.В. – Минск: БГУИР, 2016, с. 259-264. (дата обращения 29.06.2016. URL: http://conf.ostis.net/images/3/32/Изданные_материалы_OSTIS-2016.pdf).

MODEL OF COMMAND WORK OF AGENTS WITH BDI ARCHITECTURE

A.A. Kulinich (kulinich@ipu.ru)

Institute of Control Sciences of the RAS, Moscow

The mathematical model of command work of the agents, including models of the sign environment of functioning and BDI architecture of agents is offered. Conditions of cooperation of agents for overall aim achievement are formulated.

Keywords: Robots, agents, BDI architecture, a command, cooperation.