

Методы локального планирования поведения агентов с BDI-архитектурой*

М. А. Ровбо, Е. Е. Овсянникова

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена возможность решения совместной задачи группой интеллектуальных агентов с BDI-архитектурой тремя разными методами: планирование с помощью глобальной доски объявлений, координация через локальные доски и метод обменов. Все методы были реализованы для простой симуляции задачи асси-стируемого передвижения по клеточному полю, в которой исследовалась применимость такой архитектуры и методов для реальной мобильной многоагентной системы. Было показано, что сложнейшую проблему поддержания общего канала связи и ограниченность вычислительных ресурсов, можно решить путем введения локальных досок объявлений, когда каждый агент принимает решение на основе доступа к объявлениям своих соседей. Анализ метода на основе обменов показал, что его можно свести к постановке задачи STRIPS.

Ключевые слова: BDI-архитектура, многоагентная система, планирование поведения, кооперация агентов.

DOI 10.14357/20718594190107

Введение

Одной из основных задач в области групповой робототехники является проблема управления роботами. Построение многоагентных систем, в том числе, с кооперацией, осуществляется на основе различных подходов: теория общих намерений [1], теории, вырабатывающие общие для каждого агента группы планы [2, 3], централизованное управление, теория игр, BDI-архитектура (belief-desire-intention) [4, 5]. В многоагентных системах существует проблема, заключающаяся в организации коллективного взаимодействия. В качестве механизмов организации такого взаимодействия, как правило, используются различные методы коммуникации. Оно может быть реализовано, например, с помощью стигмергии (общение через изменение параметров среды). Подобное общение мо-

жет происходить как между всеми членами коллектива, так и ограничиваться локальными взаимодействиями. Передаваемая информация может состоять из планов агентов, их целей, информации об окружающем мире, а также описания внутренних параметров агентов и т.д. На основе этого можно выделить системы стайного, коллективного и роевого управления.

Теория общих намерений, развиваемая в работе [1], является одним из примеров использования BDI-агентов. Другими методами и моделями коллективного управления на основе BDI-архитектуры являются работы А. Кулинича [4, 5], а также модели в работе Rao [6]. При таком подходе управление реализуется на основе глобальной доски объявлений агентов. Однако это трудно реализуемо в реальных робототехнических мобильных системах, так как проблемой является необходимость постоянно-го поддержания стабильного канала связи.

* Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 17-29-07083 офи_м, РФФИ-16-29-04412-офи_м.

✉ Овсянникова Елена Евгеньевна. E-mail: eeovsyan@gmail.com

В данной работе рассматривается возможность использования ряда локальных досок вместо одной глобальной, так как это позволяет ограничить необходимость поддержания канала лишь между соседними агентами, причем установление этой связи может быть временным. Далее будут рассмотрены особенности построения системы на основе глобальной и локальной досок и проведено сопоставление результатов.

1. Основная часть

Архитектура агента – множество функциональных подсистем, взаимодействие которых между собой и со средой функционирования позволяет реализовать свойства интеллектуальных агентов. BDI-архитектура (Belief-Desire-Intention) – один из примеров подобных архитектур агентов, в которой представлены ментальные состояния агента в терминах его убеждений, целей и намерений [4]. 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 и может меняться по мере работы агента в некоторой среде.

Убеждения – это в простейшем случае наблюдения агента о текущем состоянии мира. Желания – это описание целевого состояния мира или его части. Ресурсы – это в некотором смысле его доступные действия (намерения). Так как интеллектуальные агенты с BDI-архитектурой имеют каждый свою индивидуальную модель мира, которая может меняться и изменять свои цели, убеждения и предпочтения в зависимости от внешнего состояния среды, в которой они находятся, то для решения задач группой таких агентов необходимо, в первую очередь, договориться об общей понятийной системе и концептуальном каркасе среды. Для решения этой задачи может использоваться обмен информацией о собственных ресурсах агента с помощью «Доски объявлений».

1.1. Глобальная доска объявлений

Оригинальный алгоритм пользуется единой доской объявлений [7], на которую все агенты помещают свои ресурсы. Важно отметить, что для решения задачи в формулировке динамиче-

ской интеллектуальной системы в такой модели требуется решать обратную задачу: нахождение воздействия, приводящего к целевому состоянию из текущего на основе знаний о динамике мира [8]. Одним из методов решения такой задачи является выбор из доступных действий такого, которое минимизирует метрику, определяющую «расстояние до цели» в пространстве состояний [2, 5]. Такой метод позволяет агенту при планировании выбирать действия, переводящие его в состояния, приближающие к цели инкрементно, и избегать необходимости построения полного плана до цели. Альтернативным методом применения глобальной доски является построение агентом полного плана до цели, включающего предположения о кооперации других агентов в виде выполнения соответствующих действий, недоступных планирующему агенту, от текущей ситуации вне зависимости от того, сколько действий для этого потребуется. Сравнение производится именно с последним вариантом алгоритма, поскольку введение адекватной метрики в пространстве состояний зачастую является непростой задачей. В то же время общий план приносит дополнительные проблемы, связанные с асинхронностью работы агентов, каждый из которых, вообще говоря, может выбрать различные цели, что приведет к возникновению конфликтов и отклонению от построенного плана. Частично эта проблема решается перепланированием на каждом шаге, что также используется в алгоритме с локальными досками.

Однако для реальных многоагентных систем этот метод добавляет дополнительное ограничение в виде возможности формирования общей доски на основе коммуникаций. Реальные системы являются распределенными и не всегда могут поддерживать единую коммуникационную сеть, поэтому возникает необходимость в локальных досках, пользующихся информацией среди тех агентов, которые находятся рядом.

1.2. Локальная доска объявлений

При таком методе группа агентов, находящаяся рядом, может временно объединяться, заполнять соответствующую информацию и отрабатывать алгоритм. Необходимость в применении локальных досок также объясняется и тем, что другие части системы будут недоступны данной группе агентов. При таком подходе

могут возникать дополнительные конфликты, так как агенты не пользуются общим планом, а также цель агента может стать недостижимой во время выполнения алгоритма.

Предлагаемым методом является применение локальных досок, каждая из которых доступна для ограниченного числа агентов, находящихся рядом. На такой доске также содержится информация о ресурсах агента, однако построение плана затрудняется по сравнению с наличием описания всех возможностей агентов, доступных на глобальной доске. Принцип действия алгоритма такой же, как и для алгоритма глобальной доски, но агент имеет доступ только к локальным доскам ресурсов своих соседей, что требует определенных модификаций алгоритма, подробнее описываемых в экспериментальной части. Список соседей изначально определен для каждого агента и является частью постановки задачи: его определяют физические особенности среды, в которой функционируют агенты, такие как близость в пространстве, наличие препятствий, блокирующих коммуникации и т.п.

1.3. Связь формулировки задачи STRIPS и метода обменов для среды с другими агентами

Работа [9] описывает метод построения структуры сюжета на основе эпизодов-обменов между персонажами литературного произведения, которые имеют цели и предметы. Построение сюжета относительно одного из персонажей осуществляется поиском пути на этом графе, которое можно рассмотреть как метод построения плана на основе его представления как последовательности обменов ресурсами агентов. Этот метод во многом близок к методам на основе обмена данными BDI-агентов через доски. Возможности и желания агентов описываются ресурсами, которые также определяют возможные действия, а планирование происходит за счет общего доступа агентов к этим данным. Среди других работ, исследующих похожие взаимосвязи между агентами, можно указать статью [10], в которой рассматриваются сети потребностей и возможностей, и работу [11], рассматривающую сети зависимости.

Отмечая различия в методах, нужно указать, что сети потребностей и возможностей уделяют особое внимание взаимосвязи потреб-

ностей и возможностей, в частности, порождению одних другими, в то время как границы между ними, определяющие, к какому агенту они относятся, имеют менее выраженный характер, например, удовлетворение потребности возможностью не обязывает обе взаимодействующие стороны к предоставлению своих возможностей (обмен неравноправен). Работа (Conte & Castelfranchi, 1996) исследует проблему выбора агента для взаимодействия и обеспечения выполнения желаемой цели и возникающие в связи с этим зависимости одних агентов от других, а также степень и динамику этих зависимостей. В этих терминах, метод обменов, рассматриваемый в данной статье, описывает планирование агентов с обоюдной зависимостью (оба агента имеют что-то, что нужно другому, причем цели могут быть и, как правило, должны быть различными).

Рассмотрим подробнее метод обменов из работы [9]. В своей оригинальной формулировке он описывает задачу следующим образом. Есть некоторое количество агентов, которые имеют ресурсы и цели. Агент может согласиться на обмен ресурсами с другим агентом, если предлагаемый ресурс удовлетворяет одно из его желаний. Таким образом, агент представляется в виде:

$$a = \langle \{t_i\}, \{g_j\} \rangle, \quad (1)$$

где $\{t_i\}$ — множество ресурсов агента, $\{g_j\}$ — желаемые ресурсы (цель).

Возможные обмены можно представить в виде графа, где узлами являются агенты, а дугами — возможные обмены [8]. Планом достижения цели является последовательность обменов, т.е. пар ресурсов разных агентов.

Отметим также, что этот метод можно рассмотреть как поиск на графе состояний, где текущим состоянием является информация обо всех ресурсах и желаниях агентов. В такой постановке метод обменов близок формулировке STRIPS [12, 13]. В этом разделе предлагается его формализация как задачи планирования и производится анализ его связи с формулировкой CPS (Common Propositional STRIPS) на основе ESP (Exact structure preserving reduction) метода [14]. ESP-сведение проблемы планирования в формализме X к проблеме планирования в формализме Y с множествами конкретных реализаций проблемы $Inst_X$ и $Inst_Y$ и множе-

ствами решений $Sol_k(\Pi)$ длины k определяется как полиномиальная функция $f: Inst_X \rightarrow Inst_Y$, отображающая каждую проблему $\Pi \in Inst_X$ в $f(\Pi) \in Inst_Y$ с сохранением количества решений $|Sol_k(\Pi)| = |Sol_k(f(\Pi))|$ длины k . Применение ESP-сведения позволяет в некоторых случаях показать эквивалентность формализмов за счет свойства транзитивности, основывающихся на теоремах, рассмотренных в работах [14,15], однако в данном случае нам достаточно использовать свойство полиномиальной сводимости задачи существования плана в разных формализмах при наличии ESP-сведения. Для того, чтобы показать, что формализм метода обменов сводится к формализму STRIPS, достаточно построить преобразование соответствующих элементов описания проблемы за полиномиальное время в формализм STRIPS, установить соответствие между планами этих формализмов и показать, что решение STRIPS также является решением в методе обменов.

Приведем стандартную формулировку задачи STRIPS без отрицаний в целях и пред условиях. Задачей CPS обозначим $\Pi' = \langle P, O, I, G \rangle$, где P — конечный набор атомарных высказываний; O — конечный набор операторов STRIPS, т.е. троек $\langle \varphi, a, \delta \rangle$, где φ — множество предусловий, a — список добавлений, δ — список удалений; I — начальное состояние (полное); G — набор высказываний (без отрицаний), представляющих собой частичное описание целевого состояния. Планом в этой формулировке также является упорядоченный набор операторов $S_n = (o_1, o_2, \dots, o_n)$, а решением $Valid_{CPS}((o_1, o_2, \dots, o_n), I, G)$ — допустимый план, который либо выполнен в начальном состоянии ($n=0, G \subseteq I$), либо удовлетворяющий рекурсивному условию $n > 0$, $Valid_{CPS}((o_1, o_2, \dots, o_n), (I - \delta(o_1)) \cup a(o_1), G)$.

Рассмотрим задачу планирования Π на основе обменов для агента γ :

$$\Pi = \langle R, T, W, A \rangle \quad (2)$$

где $R = (r_1, r_2, \dots, r_{n_k})$ — множество всех ресурсов, T — множество всех обменов (не обязательно только возможных), A — планирующий агент (его ресурсы и цели), W — описание остальных агентов (их ресурсов и желаний):

$$A = \langle a_\gamma^R, a_\gamma^S \rangle$$

$$W = \langle (a_1^R, \dots, a_{\gamma-1}^R, a_{\gamma+1}^R, \dots, a_n^R); (a_1^S, \dots, a_{\gamma-1}^S, a_{\gamma+1}^S, \dots, a_n^S) \rangle \quad (3)$$

где $a_\gamma^R \subset R$ — подмножество ресурсов планирующего агента под номером γ , a_γ^S — его цели (желания), a_i^R и a_i^S — аналогично, множество ресурсов и желаний агента с номером i .

Параметр $t^k \in T$ — действие обмена на k шаге плана, $t^k = t_{ijmn}$, т.е. передача i -м агентом ресурса m j -му агенту в обмен на ресурс n :

$$t_{ijmn}(W) = \left\langle \left(a_1^R, \dots, ((a_i^R \cup r_n) \setminus r_m), \dots \right); \left(a_1^S, \dots, a_n^S \right) \right\rangle \quad (4)$$

Если $i = \gamma$, то аналогичное преобразование выполняется над множествами планирующего агента $A = \langle a_\gamma^R, a_\gamma^S \rangle$. При этом для допустимости действия необходимо, чтобы ресурсы r_m и r_n принадлежали изначально соответствующим агентам, а агент j имел в желаниях предлагаемый ему ресурс r_m , т.е. $r_m \in a_i^R, r_n \in a_j^R, r_m \in a_j^S$.

Планом из n действий будем называть последовательность действий

$\Delta_n = \langle t^1, \dots, t^n \rangle, \Delta_0 = \langle \emptyset \rangle$. План допустим, если каждое действие в нем допустимо (в соответствующем состоянии мира). План Δ_n является решением задачи планирования $\Pi = \langle R, T, W, A \rangle$,

т.е. $Valid_{transfer}(\langle t^1, \dots, t^n \rangle, W, A)$ тогда и только тогда, когда либо $n = 0$ и $a_\gamma^S \in a_\gamma^R$, либо $n = 0$ и $Valid_{transfer}(\langle t^2, \dots, t^n \rangle, t^1(W), t^1(A))$.

Теперь сведем формулировку метода обмена к формулировке CPS, построив функцию полиномиальной сложности, позволяющую получить входные данные задачи STRIPS из условий задачи обменов $f: \Pi \rightarrow \Pi'$. Если такая функция будет определена для всех Π и будет сохранять количество решений, то она будет ESP-сведением и можно будет сделать определенные выводы о выразительной мощности этих формулировок.

Построим f , перейдя от множеств в методе обменов к пропозициональному представлению

в виде атомов, где наличие ресурса j у агента i можно обозначить как p_{ij} . Цели (желания) агента i относительно ресурса j при этом обозначим p_{ij}^g . Такие атомарные формулы будут образовывать P . Для удобства разобьем их по подмножествам $P = P_r \cup P_g$, где $P_r = \bigcup_{ij} p_{ij}$,

$P_g = \bigcup_{ij} p_{ij}^g$. Сформируем начальное состояние

$I = \bigcup_i f(a_i^R) \bigcup_{i \neq \gamma} f(a_i^g)$, $I \subseteq P$ где ресурс j агента

i отображается в атом p_{ij} , т.е. $f(r_j) = p_{ij}$, $r_j \in a_i^R$. Стоит подчеркнуть, что ресурсы всех агентов, включая планирующего, в этом случае становятся частью описания состояния системы. Однако только желания других агентов являются частью состояния, цели же планирующего агента выносятся в $G = f(a_i^g) \in P_g$. Таким образом, желания остальных агентов становятся фактами, необходимыми для определения того, возможен ли с ними тот или иной обмен, в то время как желания планирующего агента преобразуются в ресурсное описание (в виде атомарных высказываний относительно принадлежности ресурсов этому агенту) целевого состояния.

Осталось определить, как формируются операторы $O = \langle \varphi, a, \delta \rangle$, т.е. $f(t_{ijmn}) = \langle \varphi', a', \delta' \rangle$.

Это можно сделать, сопоставив обменам соответствующие правила (требуется наличие соответствующих ресурсов для обмена и желания принимающего запрос агента получить предлагаемый ресурс):

$$\begin{aligned} \varphi' &= (p_{im}, p_{jn}, p_{jm}^g) \\ a' &= (p_{in}, p_{jm}) \\ \delta' &= (p_{im}, p_{jn}) \end{aligned} \quad (5)$$

Так как планы состоят из элементов множеств O (в формализации STRIPS) и T (в формализации описанного метода обменов), а вышеприведенные формулы описывают биекцию между ними, то между планами в разных формулировках также устанавливается взаимоднозначное соответствие. Эти же правила участвуют в определении допустимости применения действия, поэтому допустимость планов сохраняется при переходе с помощью функции f от одной формулировки к другой.

После применения описанного выше преобразования, задача в формулировке метода обменов

$$\Pi = \left\langle \begin{aligned} R &= \bigcup_{j=1}^{n_k} r_j \\ T &= \bigcup_{ijmn} t_{ijmn} \\ W &= \left\langle \left(a_1^R, \dots, a_{\gamma-1}^R, a_{\gamma+1}^R, \dots, a_{n_a}^R \right), \right. \\ &\quad \left. \left(a_1^g, \dots, a_{\gamma-1}^g, a_{\gamma+1}^g, \dots, a_{n_a}^g \right) \right\rangle \\ A &= \langle a_\gamma^R, a_\gamma^g \rangle \end{aligned} \right\rangle$$

Перейдет в следующую формулировку STRIPS:

$$\Pi' = \left\langle \begin{aligned} P &= \bigcup_{ij} p_{ij} \\ O &= \bigcup_{ijmn} \left\langle \left(p_{im}, p_{jn}, p_{jm}^g \right), \left(p_{in}, p_{jm} \right), \right. \\ &\quad \left. \left(p_{im}, p_{jn} \right) \right\rangle \\ I &= \bigcup_{ij} (a_i^R)_j \cup \bigcup_{i \neq \gamma, j} (a_i^g)_j \\ G &= f(a_\gamma^g) \end{aligned} \right\rangle,$$

где $p_{ij} = (r_j \in a_i^R)$.

Таким образом, формулировку задачи метода обменов можно свести естественным образом к классической формулировке STRIPS за полиномиальное время с сохранением количества решений, а значит, функция f является EPS-сведением. Из этого можно сделать вывод, что формулировка в методе обменов не более выразительна, чем STRIPS. В то же время свести STRIPS в общей постановке (т.е. доказать, в некотором смысле, их эквивалентность) к формулировке метода обменов вряд ли возможно. Это связано с тем, что в методе обменов условия применимости действий связаны с желаниями агентов, а не с отдельными ресурсами (т.е. высказывания группируются по принадлежности к одному агенту), в то время как STRIPS позволяет накладывать условия на изменение высказываний независимо.

Стоит отметить, что преимуществом более узкого класса рассматриваемых задач в методе обменов является возможность для нахождения решения применить поиск на графе, который не требует построения вершин операторами STRIPS. Иными словами, решение находится на меньшем графе, описывающем лишь текущее состояние и возможные обмены в нем.

2. Эксперименты

Цель проведения экспериментов - качественная проверка работоспособности алгоритма на основе графа обменов, сравнение трех различных алгоритмов планирования и определение их особенностей с помощью одинаковой тестовой задачи. Для проведения экспериментов была создана библиотека в среде Python, которая позволяет инициализировать агентов, их цели, ресурсы и положение в среде функционирования. При запуске программы создаются агенты, количество которых можно менять в зависимости от требований пользователя. У каждого агента есть идентификатор, его ресурсы, цели и исходное состояние. Библиотека позволяет использовать для решения задачи любой метод с совместимым интерфейсом. Все три рассмотренных в статье метода запускались для одной и той же постановки задачи и пользуются одинаковыми входными данными, за исключением дополнительного ограничения в виде наличия соседей у метода локальных досок. Среда строилась таким образом, чтобы быть близкой к примеру работы BDI-агентов, описанному в [8].

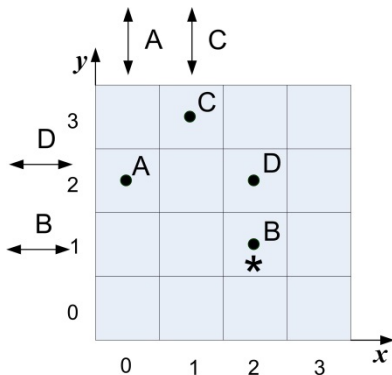


Рис. 1. Подпространства классов состояний понятийной системы агентов A, B, C, D

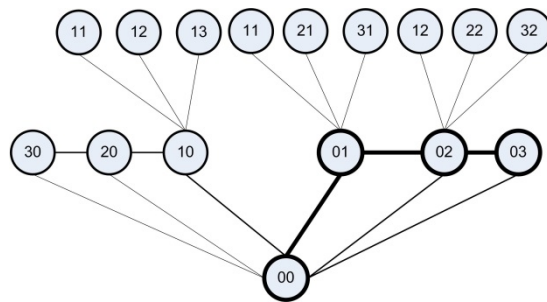


Рис. 2. Граф понятийной системы агента A

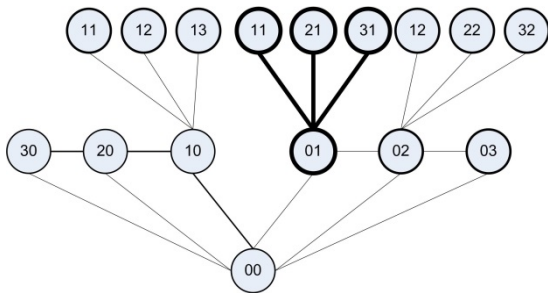


Рис. 3. Граф понятийной системы агента B

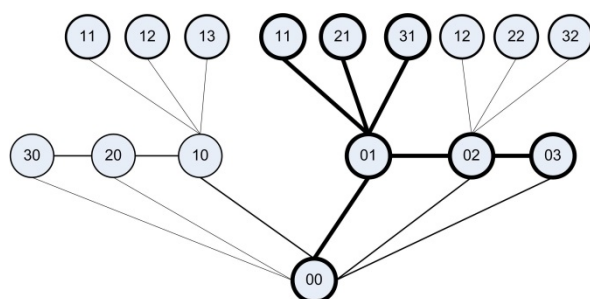


Рис. 4. Граф понятийной системы совместного функционирования агентов A и B

2.1. Глобальная доска

В качестве базового алгоритма для сравнения рассматривалась реализация предложенного в статье [7] метода на основе глобальной доски. Ресурсом агента в задаче является его возможность по перемещению себя или другого агента, а состояние, соответственно, представляет собой координаты (номер клетки по горизонтали и вертикали), в которой находится агент. Начальные позиции агентов, их желания и доступные ресурсы приведены в Табл. 1.

В тестовом примере агенту А необходимо попасть в точку с координатами (2,1). Самостоятельно это сделать он не может, так как его передвижение ограничено вертикалью, т.е. координатами (0,0), (0,1), (0,2), (0,3). В нужное положение его может доставить агент В, который имеет возможность передвигаться по горизонтали (0,1), (1,1), (2,1), (3,1).

Алгоритм планирования, работающий на основе глобальной доски, для каждого агента был реализован следующим образом.

1. Все агенты располагают информацию о своих ресурсах на общей доске.

2. Агент проверяет, достигнута ли цель (сравнивая свое состояние с целевым), если достигнута, то она убирается из списка целей и этап планирования завершается.

3. Агент проверяет, может ли он дойти до желаемой точки самостоятельно или ему требуется помощь, проверяя наличие целевого состояния в своих ресурсах. Если оно есть в списке своих ресурсов, то он возвращает в качестве плана это действие и этап планирования завершается.

4. Агент не может дойти самостоятельно. На основании данных с общей доски он строит граф доступных состояний наподобие изображенного на Рис. 4. Построение графа состоит из двух частей. Сначала, для каждого агента, включая себя, ресурсы объединяются в пары,

образуя декартово произведение множества ресурсов конкретного агента. После этого графы других агентов сливаются по очереди с текущим графом планирующего агента, присоединяясь по общим вершинам, т.е. по состояниям, доступным обоим агентам. Начальное состояние, так же, как и доступные, будет одной из вершин этого графа, а ребра будут являться доступными переходами в одно действие. При этом переход осуществим либо самим агентом, либо другим, который его перенесет (изменит его состояние).

5. Агент ищет путь на совместном графе и, если не находит его, то считает, что цель недостижима и прекращает процедуру планирования. В противном случае, он возвращает полученный путь в качестве решения и либо выполняет следующее движение (если оно доступно ему), либо запрашивает его выполнение у другого агента (в таком случае, он уже должен находиться на этом этапе в состоянии, доступном другому агенту).

6. Этап планирования завершается. На каждом такте работы системы информация на доске обновляется, а агент делает одно действие (либо самостоятельное, либо его выполняет другой агент над ним).

Основная программа обрабатывала в каждом цикле последовательно по одному шагу каждого агента. Если у агента не было цели или не было обнаружено плана ее достижения, то он не выполнял никакого действия. Ресурсами агентов являлась возможность перемещения по осям x и y на некоторое количество «шагов». Целями агентов являлось достижение некоего желаемого состояния — определенной, изначально отмеченной точки на координатной плоскости. Результатами выполнения методов являлся найденный путь, в случае, если его можно было построить, и пустой путь, если построить его нельзя. Алгоритмы не находят решения в случае, если нет «пересечений» путей

Табл. 1. Входные данные задачи

Параметр	Агент А	Агент В	Агент С	Агент D
Текущее местоположение	(0,2)	(2,1)	(1,3)	(2,2)
Возможные местоположения	(0,0), (0,1), (0,2), (0,3)	(0,1), (1,1), (2,1), (3,1)	(1,3), (2,3), (3,3)	(0,2), (1,2), (2,2)
Желаемое (целевое) состояние	(2,1)	()	()	()

агента, который ищет путь к цели и агента, который ему в этом помогает. В некоторых случаях алгоритмы строят более сложный путь к цели, чем он мог бы быть.

2.2. Локальные доски

Рассмотренный алгоритм глобальной доски подразумевает взаимодействие всех агентов между собой. На практике это трудно реализуемо, поэтому был предложен алгоритм с использованием локальных досок. Отличительной особенностью этого алгоритма является наличие у каждого агента доски объявлений, на которой располагаются его ресурсы, вместо единой общей доски, а также построение графа для поиска пути, который учитывает исключительно информацию от доступных соседей об их возможностях. Вместо этого можно было бы попробовать организовать систему передачи информации о ресурсах за счет того, что несколько агентов, не являющихся соседями, могут иметь общего соседа. Однако в такой ситуации можно реализовать этот обмен на более низком уровне сетевых протоколов и обозначить всю связную подсеть из мобильных агентов как соседей. Стоит еще раз отметить, что ограничение возможности общения на соседей — это особенность работы мобильных агентов в среде, приближенной к реальной, поэтому информация о том, какие агенты являются соседями определяется, как часть постановки задачи. Более того, наборы соседей могут меняться в течение работы системы. Предлагаемый здесь алгоритм поддерживает такую ситуацию, однако в эксперименте пары соседей для простоты считались фиксированными на протяжении работы системы.

Рассмотрим алгоритм планирования отдельного агента для алгоритма с локальными досками. Алгоритм планирования, работающий на основе глобальной доски, для каждого агента был реализован следующим образом:

1. Агент опрашивает соседей (т.е. агентов, с которыми имеет непосредственную связь) о доступных ресурсах и формирует из них и своих ресурсов локальную доску.

2. Агент проверяет, достигнута ли цель (сравнивая свое состояние с целевым), если достигнута, то она убирается из списка целей и этап планирования завершается.

3. Агент проверяет, может ли он дойти до желаемой точки самостоятельно или ему требуется

помощь, проверяя наличие целевого состояния в своих ресурсах. Если оно есть в списке своих ресурсов, то он возвращает в качестве плана это действие и этап планирования завершается.

4. Агент не может дойти самостоятельно. На основании данных с локальной доски он строит граф доступных состояний. Граф строится аналогичным образом, как и в случае с глобальной доской, но на основе данных локальной доски.

5. Агент ищет путь на полученном графе и, если не находит его, то считает, что цель недостижима и прекращает процедуру планирования (не предпринимает действий на данном шаге). В противном случае, он возвращает полученный путь в качестве решения и либо выполняет следующее движение (если оно доступно ему), либо запрашивает его выполнение у «соседнего» агента.

6. Этап планирования завершается. На каждом такте работы системы информация на доске обновляется, при этом может меняться список соседей, а агент делает одно действие (либо самостоятельное, либо его выполняет другой агент над ним).

В эксперименте соседями агента А были обозначены агенты В, С, D, соседями агента В — агенты А, С, соседями агента С — агенты А и В, соседом агента D — агент А. При планировании алгоритм с локальными досками работает почти так же, как и с глобальной доской, за исключением того, что текущая доска формируется на каждом шаге из возможностей всех соседей текущего (планирующего) агента и, если их ресурсы содержат желаемую цель, тот может попросить о помощи (воспользоваться ресурсами соседей), в противном случае агент будет ждать изменения ситуации: цель может стать доступной при добавлении новых агентов к соседям в силу неконтролируемых изменений в среде или их собственных действий. Стоит отметить, что при такой постановке задачи агент может не найти пути, даже если он, фактически, существует. Обнаружение соседей не является частью алгоритма, поэтому, если он находится изначально далеко от цели (и, скорее всего, не имеет среди «соседей» тех агентов, которые могут доставить его за небольшое число шагов к цели), то агент даже не начнет движение в ее сторону, что могло бы в реальном сценарии позволить ему обнаружить новых соседей и завершить выполнение успешно.

2.3. Алгоритм с обменами

Расширим метод планирования на основе обменов, описанный в работе [8], до общей постановки, пригодной для решения задач, в которых агенты описаны в рамках BDI- архитектуры с ресурсами, действиями и целями. Рассматривать будем его также на примере задачи перемещения агентов по клеточному полю.

Пусть на поле (Рис. 1) есть два агента (А и В) в позициях (0, 2) и (2, 1), соответственно. Агент А может перемещаться по своей вертикали ($x=0$), а агент В – по горизонтали $y=1$. Цель агента А – попасть в позицию (2,1), у агента В цели нет. У агентов есть способность перетаскивать друг друга вдоль «своей» линии, при условии, что они оказываются в одной клетке. Запишем это в терминах BDI-архитектуры, описанных выше, отметив каждое действие агентом, над которым оно совершается:

$$\begin{aligned} A &= \langle \{d00A, d01A, d02A, d03A\}, \{d21A\} \rangle \\ B &= \langle \{d01B, d11B, d21B, d31B\}, \{ \} \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь первое множество кортежа описывает ресурсы (доступные действия) агента, а второе — его цели. $d00A$ обозначает возможное действие, которое может быть совершено над агентом А и перемещает его в состояние 00 (координаты клетки 00).

Такое описание содержит ряд проблем для реализации метода обменов. Во-первых, агент В не содержит никаких целей, поэтому не будет меняться ни с кем. Во-вторых, в задаче у агентов должна быть возможность не только самим передвигаться по клеткам, но и передвигать других. На языке обменов такое действие будет означать «передачу», к примеру, агентом А состояния $d00B$ агенту В. Иначе говоря, в методе обменов ресурсами выступают не действия, а их результаты. В-третьих, обмен подразумевает передачу ресурса. Это означает, что у одного агента он должен исчезнуть, а у другого — появиться. Очевидно, что действия, в большинстве случаев, можно совершать повторно, а их возможность совершения фактически не передается другому агенту. Наконец, доступность ресурса определяется выполнимостью предусловия совершения этого действия в данный момент времени. Тогда проблемой является планирование промежуточных действий.

Проиллюстрируем последнее следующим примером: агент В может перенести агента А в

нужную тому клетку (2,1). Для этого необходимо, чтобы агент А находился на клетке, доступной для агента В (т.е. на горизонтали $y=1$). В начальной ситуации агент А находится на другой горизонтали. В то же время, он мог бы переместиться самостоятельно на горизонталь $y=1$. Но в начальной ситуации у агента В нет нужного агенту А ресурса (так как он вне досягаемости), поэтому обмена произойти не может. Заметим, что для того, чтобы определить возможность такого обмена, необходимо просчитать доступные действия агентов на несколько шагов вперед. Конкретная реализация этого механизма пополнения доступных обменов выходит за рамки описания этой статьи, однако можно указать, что механизмы поиска по графу или же другие механизмы планирования могут вызываться локально (не для решения всей проблемы, но для пополнения части описания), после чего можно применить механизм обмена.

Теперь рассмотрим, как решить три другие перечисленные проблемы и расширить описание метода. Первая проблема решается путем добавления некоего виртуального ресурса и потребности в нем каждому из агентов. Заметим, что он опционален, например, не обязательно добавлять его агентам, у которых есть желания. Желания агента выполняются в порядке очередности слева направо:

$$\begin{aligned} A &= \langle \{d00A, d01A, d02A, d03A, M\}, \{d21A, M\} \rangle \\ B &= \langle \{d01B, d11B, d21B, d31B, M\}, \{M\} \rangle \end{aligned} \quad (7)$$

Вторая проблема решается также введением результатов доступных действий в список ресурсов:

$$\begin{aligned} A &= \langle \{d00A, d01A, d02A, d03A, M\} \cup \{d00B, d01B, d02B, d03B\}, \{d21A, M\} \rangle \\ B &= \langle \{d01B, d11B, d21B, d31B, M\} \cup \{d01A, d11A, d21A, d31A\}, \{M\} \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

Третья проблема решается сокращением ресурсов и потребностей у агентов, у которых они выполняются (ресурс, удовлетворяющий потребность, удаляется вместе с этой потребностью при обмене). Таким образом, другой агент не станет обладать возможностями, которыми он ранее обладал. Для тех действий, которые агентам доступны, примем ресурс выполнения бесконечным:

$$A = \left\langle \left\{ d00A, d01A, d02A, d03A, \right\}, \left\{ d21A, M_{\infty} \right\} \right\rangle$$

$$B = \left\langle \left\{ d01B, d11B, d21B, d31B, d01A, \right\}, \left\{ M_{\infty} \right\} \right\rangle \quad (9)$$

Итого, алгоритм планирования на основе метода обменов будет выглядеть следующим образом:

1. Все агенты публикуют информацию о своих ресурсах (на этом шаге алгоритма это аналог глобальной доски).

2. Агент проверяет, достигнута ли цель (сравнивая свое состояние с целевым), если достигнута, то цель убирается из списка целей и этап планирования завершается.

3. Агент проверяет, может ли он дойти до желаемой точки самостоятельно или ему требуется помощь, проверяя наличие целевого состояния в своих ресурсах. Если оно есть в списке своих ресурсов, то он возвращает в качестве плана это действие и этап планирования завершается.

4. Агент не может дойти самостоятельно. На основании опубликованных всеми агентами данных и собственных ресурсов он обновляет информацию о возможностях всех агентов, добавляя каждому возможность применения имеющегося ресурса к другому достигаемому агенту (переход от формулы (7) к формуле ((8)). На основе обновленной информации о ресурсах (возможностях) всех агентов и их опубликованных целях, он строит граф обменов (Рис. 5).

5. Агент ищет путь на полученном графе и, если не находит его, то считает, что цель недостижима и прекращает процедуру планирования (не предпринимает действий на данном шаге). В противном случае, он возвращает полученный путь в качестве решения и либо выполняет следующее движение (если оно доступно ему), либо запрашивает его выполнение у «соседнего» агента, взамен передавая ему нужный тому ресурс (фиктивный ресурс «деньги» или выполнение действия из своих возможностей).

6. Этап планирования завершается. На каждом такте работы системы информация обновляется, а агент выполняет либо один обмен, либо одно самостоятельное действие.

Приведем полное решение с учетом всех дополнений. Начальные условия задачи описы-

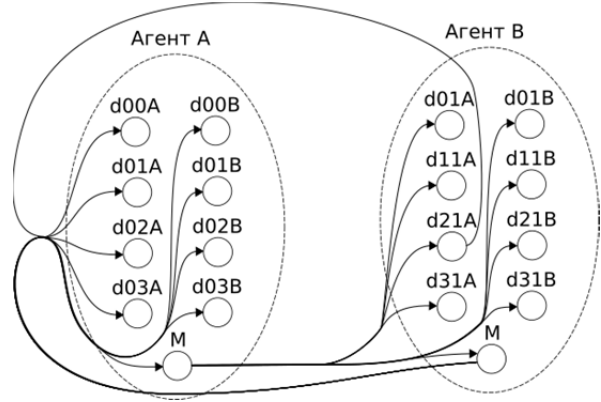


Рис. 5. Пример графа обменов

ваются формулой (6). Заметим, что агент *B* не может перенести агента *A* в желаемое состояние при начальных условиях, так как не может самостоятельно до него добраться. Построить начальное состояние до описания, приведенного в формуле (9) можно, перебрав все доступные действия агентов в начальной ситуации и добавив новые возможности в полученных ситуациях к начальным ресурсам. Соответствующий ей граф обмена приведен на Рис. 5. Путь к желаемой вершине *d21A* из вершин, ассоциированных с агентом *A*, находится в шаге 1 на графе. Решением является обмен $t_{A,B,M,d21A}$, который можно описать следующим образом:

$$(A:M) \Leftrightarrow (B:d21A) \quad (10)$$

Это обозначает обмен, состоящий в передаче агентом *A* ресурса *M* агенту *B* и переносе агента *A* в положение *d21* агентом *B* («передаче» ресурса положения агенту *A*), в результате которого желание агента *A* выполняется и удаляется.

Таким образом, предложенный алгоритм на основе метода обменов может использоваться для определения взаимодействия и планирования агентов в коллективах, в которых многие агенты, несмотря на кооперативность, обладают собственными индивидуальными и разнообразными целями.

Результаты экспериментов на компьютерной модели показали, что метод планирования с локальными досками более удобен для практической реализации по сравнению с использованием одной глобальной доски. Однако использование локальных досок не гарантирует нахождение решения даже когда оно есть, более того, проблемой является синхронизация между обновлениями досок и шагами отдель-

ных агентов. При этом стоит отметить, что вариации обоих методов с использованием вместо поиска пути на всем графе метрики близости к цели могут позволить производить итеративное улучшение состояния вплоть до целевого, однако это требует естественной метрики в пространстве состояний с особыми характеристиками.

Эксперименты проводились для проблемы перемещения по двумерной плоскости, разбитой на связанные участки, при которой действия агентов сводятся к перемещению или переносу одного агента другим. При этом план действий строится, опуская последовательные переходы одним и тем же агентом, оставляя лишь переходные точки (когда меняется агент, исполняющий действие). В более общей задаче планирования нужны неподдерживаемые в этих трех методах предусловия (либо сложно интегрируемые в них путем перечисления подходящих состояний мира). В общем виде проблемой является определение состояния агента. Пересечения по доступным состояниям зависят от выбора представления состояния (в общем случае всегда верны только, если являются полными состояниями мира). Единственным условием, накладывающим ограничение на действия, является требование наличия состояний двух агентов, являющихся общими состояниями (оба агента могут достичь одной и той же позиции).

В методе обмена условием совершения действий является наличие у взаимодействующих агентов соответствующих желаний и возможностей, способных их удовлетворить. Однако условие при этом связано с парой агентов, а не с действием. Тогда, если выполняема одна пара действий у двух агентов, то и все остальные пары их действий также выполнимы. Это также накладывает ограничение на доступные для описания предусловия.

Заключение

В работе были реализованы и рассмотрены три метода планирования для BDI-архитектуры: планирование на основе глобальной доски объявлений, локальных досок и обменов. Метод на основе глобальной доски требует наличия постоянно поддерживаемого общего канала связи между всеми агентами и имеет несколько вариантов работы: жадный поиск на

основе метрики близости к цели (в некоторых случаях его можно заменить на аналитическую оценку агентами необходимых действий в пространстве состояний), и определение полного плана на всем графе, составленном из ресурсов агентов. Преимуществом первого из них является локальность планирования, а недостатком — проблема выбора подходящей метрики.

Второй метод требует построения графа ресурсов и переходов для всех агентов, что в реальных задачах может оказаться слишком большим пространством поиска, в особенности для отдельных мобильных роботов с ограниченными ресурсами. Его модификация в виде использования локальных досок по своей сути не отличается от него вычислительной сложностью, кроме того, что рассматриваются только ресурсы соседей. С одной стороны, это уменьшает пространство поиска, с другой — если проблема требует возможностей агентов, не являющихся соседями планирующего, то план не сможет быть построен. Также эта модификация описывает работу без общего канала связи, ограничиваясь теми агентами, которые доступны в текущий момент (соседями). Этот алгоритм больше подходит для решения физически локальных задач для мобильных агентов.

Был также рассмотрен алгоритм на основе метода обменов, предложены его формализация как задачи планирования и некоторые модификации, важные с практической точки зрения для кооперации агентов (введение фиктивного ресурса, который позволяет «обмениваться» агентам, только один из которых реально выполняет задачу, важную другому). Анализ этого метода показал, что он способен работать с подклассом задач STRIPS, при этом пространство поиска можно соответствующим образом сузить, рассматривая не граф состояний и переходы по ним, а граф обменов, состоящий из ресурсов и возможных обменов.

Исследованные методы соотносятся с концепцией статического роя [16], который является одной из базовых форм организации групп роботов. С одной стороны, в статическом рое имеется возможность организации совместных вычислений, поскольку он образует сеть с фиксированной топологией. С другой стороны, такая система может обладать всеми свойствами, присущими группе мобильных роботов, включая движение, взаимодействие со средой и т.д. Алгоритм с глобальной доской реализуем для

агентов в статическом рое за счет того что все агенты связаны между собой. Однако метод с локальными досками предоставляет более естественные средства коммуникации в статическом рое, поскольку исходит из локальности взаимодействий. Перспективами развития этого метода является исследование проблемы влияния на планирование разбиения группы роботов на несколько статических роев, а также эффективность подобных разбиений с точки зрения возможности решения задач и сложности построения плана.

Литература

1. Cohen P.R., Levesque H.J. Teamwork // *Noûs*. 1991. Vol. 25, no 4. P. 487–512.
2. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит. 2009. 280 с.
3. Grosz B.J., Kraus S. Collaborative Plans for Complex Group Actions // *Artif. Intell.* 1996. Vol. 86, no 2. P. 269–358.
4. Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Часть 1. Качественная среда функционирования. Основные определения и постановка задачи // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2017. № 3. С. 38–48.
5. Кулинич А.А. Стайные алгоритмы формирования и функционирования команд агентов // *Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «AIS-IT' 16»*. Таганрог: Изд-во «ЮФУ». 2016. С. 301–310.
6. Rao A.S., Georgeff M.P. BDI Agents: From Theory to Practice // *Proc. First Int. Conf. Multiagent Syst.* 1995. Vol. 95. P. 312–319.
7. Кулинич А.А. Модель командного поведения агентов в качественной семиотической среде. Часть 2. Модели и алгоритмы формирования и функционирования команд агентов // *Искусственный интеллект и принятие решений*. 2018. № 1. С. 29–40.
8. Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. М.: УРСС, 2019. 352 с.
9. Карпов В.Э., Мещерякова Т.В. Об автоматизации нетворческих литературных процессов // *Информационные технологии*. 2004. № 8. С. 56–63.
10. Vittikh V.A., Skobelev P.O. Multiagent Interaction Models for Constructing the Needs-and-Means Networks in Open Systems // *Autom. Remote Control*. 2003. Vol. 64, no 1. P. 162–169.
11. Conte R., Castelfranchi C. Simulating Multi-Agent Interdependencies. A Two-Way Approach to the Micro-Macro Link // *Social Science Microsimulation*. 1996. P. 394–416.
12. Осипов Г.С. Методы искусственного интеллекта. М.: Физматлит. 2011. 296 с.
13. Fikes R.E., Nilsson N.J. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving // *Artif. Intell.* 1971. Vol. 2, no 3–4. P. 189–208.
14. Bäckström C. Expressive equivalence of planning formalisms // *Artif. Intell.* 1995. Vol. 76, no 1–2. P. 17–34.
15. Bäckström C. Computational Complexity of Reasoning about Plans. Doctoral dissertation. Linköping University, Linköping, Sweden. 1992. 221 p.
16. Карпов В.Э. Управление в статических роях. Постановка задачи // *Труды VII-й международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте»*. М.: Физматлит. 2013. с. 730–739.

Methods of local behavior planning for agents with BDI architecture

M. A. Rovbo, E. E. Ovsyannikova

National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

Abstract. The paper deals with the possibility of solving a collective task by a group of intelligent agents with the BDI architecture using three different methods: planning using a global announcement board, coordination through local boards and the exchange method. The new method proposed in the article is the local boards method based on the modification of the global board method. Also the analysis of the exchange method with the proposed formalization and application of the polynomial reduction method was conducted. All three methods were implemented on a simple simulation of the task of assisted movement on a grid, which explored the applicability of the architecture and methods for a real mobile multi-agent system. The special features of the task are the difficulty of maintaining a common communication channel and the limited computational resources. It was shown that this problem can be solved by introducing local announcement boards, when each agent makes a decision based on access to the advertisements of its neighbors. An analysis of the method based on exchanges has shown that it can be reduced to the formulation of the STRIPS problem. The exchange method allows to make a search on a smaller graph in comparison to the STRIPS method.

Keywords: BDI architecture, multi-agent system, behavior planning, agent cooperation.

DOI 10.14357/20718594190107

References

1. Cohen, P. R., & Levesque, H. J. 1991. Teamwork. *Noûs* 25(4):487–512. doi:10.2307/2216075.
2. Kalyaev, I. A., Gaiduk, A. R., & Kapustyan, S. G. 2009. Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniya v gruppakh robotov [Collective control models and algorithms for groups of robots]. Moscow: Fizmatlit. 280 p.
3. Grosz, B. J., & Kraus, S. 1996. Collaborative Plans for Complex Group Actions. *Artificial Intelligence* 86(2): 269–358.
4. Kulinich, A. A. 2017. Model' komandnogo povedeniya agentov v kachestvennoi semioticheskoi srede. Chast' 1. Kachestvennaya sreda funktsionirovaniya. Osnovnye opredeleniya i postanovka zadachi [Model of team behavior of agents in a qualitative semiotic environment. Part 1. Qualitative operating environment. Basic definitions and problem statement]. *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* [Artificial intelligence and decision-making] (3):38–48.
5. Kulinich, A. A. 2016. Stainye algoritmy formirovaniya i funktsionirovaniya komand agentov [Pack algorithms of formation and functioning of teams of agents]. In *Trudy kongressa po intellektual'nym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «AIS-IT» 16»* [AIS-IT' 16]. pp. 301–310. Taganrog: Izd-vo "YuFU."
6. Rao, A. S., & Georgeff, M. P. 1995. BDI Agents: From Theory to Practice. *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems*. 95: 312–319.
7. Kulinich, A. A. 2018. Model' komandnogo povedeniya agentov v kachestvennoi semioticheskoi srede. Chast' 2. Modeli i algoritmy formirovaniya i funktsionirovaniya komand agentov. [Model of team behavior of agents in a qualitative semiotic environment. Part 2. Models and algorithms for the formation and functioning of teams of agents] *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* [Artificial intelligence and decision-making]. (1): 29–40.
8. Karpov, V. E., Karpova, I. P., & Kulinich, A. A. 2019. Sotsial'nye soobshchestva robotov [Social communities of robots]. Moscow: URSS. 352 p.
9. Karpov, V. E., & Meshcheryakova, T. V. 2004. Ob avtomatizatsii netvorcheskikh literaturnykh protsessov [Automating noncreative literary processes]. *Informatsionnye tekhnologii* [Information technologies]. (8): 56–63.
10. Vittikh, V. A., & Skobelev, P. O. 2003. Multiagent Interaction Models for Constructing the Needs-and-Means Networks in Open Systems. *Automation and Remote Control*. 64(1): 162–169. doi:10.1023/A:1021836811441.
11. Conte, R., & Castelfranchi, C. 1996. Simulating Multi-Agent Interdependencies. A Two-Way Approach to the Micro-Macro Link. In *Social Science Microsimulation*. pp. 394–416.
12. Osipov, G. S. 2011. Metody iskusstvennogo intellekta [Artificial intelligence methods]. Moscow: Fizmatlit. 296 p.
13. Fikes, R. E., & Nilsson, N. J. 1971. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial Intelligence* 2(3–4): 189–208. doi:10.1016/0004-3702(71)90010-5.
14. Bäckström, C. 1995. Expressive equivalence of planning formalisms. *Artificial Intelligence* 76(1–2): 17–34.
15. Bäckström, C. 1992. Computational Complexity of Reasoning about Plans. Doctoral dissertation. Linköping University, Linköping, Sweden. 210 p.
16. Karpov, V. E. 2013. Upravlenie v staticheskikh royakh. Postanovka zadachi. [Control for static swarms. Problem statement] In *Trudy VII-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Integrirovannye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte»* [Proceedings of VII international scientific and applied conference "Integrated models and soft computation in artificial intelligence"]. pp. 730–739. Moscow: Fizmatlit.