

# Применение мультиагентной системы для решения задачи формирования групп агентов

А. С. Горященко

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Одной из задач, решаемых в рамках агентного моделирования, является проблема формирования групп агентов. В результате анализа литературных данных выбрана мультиагентная система SPADE, созданная на языке программирования Python. Для проверки работоспособности реализован жадный алгоритм формирования групп агентов. В результате исследования свойств программной реализации установлено, что возможности мультиагентной системы SPADE достаточны для применения более сложных и интеллектуальных алгоритмов формирования групп. Намечены пути расширения программной реализации для использования когнитивных агентов, то есть агентов, использующих знаковый подход и обладающих собственной картиной мира.

**Ключевые слова:** агентное моделирование, мультиагентная система SPADE, формирование групп агентов.

DOI 10.14357/20718594190408

## Введение

Для изучения свойств сложных динамических систем широко применяется агентное моделирование. Агенты – это небольшие составные части системы, которые могут взаимодействовать друг с другом и с системой. Они автономны, децентрализованы и не имеют полной информации обо всей системе, могут реагировать на различные события, например, на сообщения от других агентов, от системы и тд. Агентное моделирование основано на наблюдении за изменениями в поведении системы в целом при изменении поведения или свойств индивидуальных агентов, входящих в состав этой системы.

Для создания, управления, поиска агентов и передачи сообщений между ними используют специализированные программные средства – мультиагентные системы. В рамках одной си-

стемы могут быть созданы агенты различных типов с разными свойствами и поведением, в том числе и когнитивные агенты на основе знаковой картины мира, моделирующие когнитивные функции сознания человека [1, 2].

Целью данной статьи является: выбор мультиагентной системы для работы с большим количеством агентов; оценка ее быстродействия на модельной задаче; изучение возможности использования когнитивных агентов в рамках этой системы.

## 1. Мультиагентные системы

К настоящему времени наиболее известными и широко применяемыми мультиагентными системами являются SPADE [3] (язык программирования Python) и JADE [4] (язык программирования Java).

Важными характеристиками мультиагентной системы являются ее масштабируемость и

✉ Горященко А.С. E-mail: a.goriashchenko@gmail.com

производительность. Согласно [5], для количества агентов, не превышающего 100, производительность мультиагентной системы SPADE выше, чем мультиагентной системы JADE. В работе [6] были изучены масштабируемость и производительность системы SPADE для нескольких сотен агентов. Для численной характеристики был использован параметр «среднее время возврата сообщения» (round trip time, RTT) [7]. Этот параметр обозначает время, затраченное с момента отправки сообщения в адрес некоторого получателя и до получения копии сообщения от него. Скорость увеличения RTT с ростом количества агентов в системе позволяет численно характеризовать масштабируемость и производительность мультиагентной системы. В результате экспериментов было установлено, что мультиагентная система SPADE обладает хорошими масштабируемостью и производительностью.

Согласно литературным данным, мультиагентная система SPADE была использована для реализации различных алгоритмов агентного моделирования сложных систем. Статья [8] посвящена моделированию «умных электрических сетей» (smart grid). Поставщики и потребители в таких сетях могут обмениваться информацией между собой, сообщая о своих текущей и прогнозной потребности в электроэнергии. Стоимость электроэнергии у поставщиков может меняться в течение дня. Одни потребители могут прервать потребление электроэнергии, а другие – нет. Потребители устанавливают пороговую цену электроэнергии, выше которой они отказываются ее покупать. Требуется в результате переговоров о цене обеспечить потребителей электроэнергией, минимизируя при этом ее суммарную стоимость. В работе каждый агент моделирует поведение потребителя. Также имеется агент-планировщик, который отвечает за распределение энергии среди агентов-потребителей. Потребители электроэнергии сообщают о требуемом им объеме и о предельной цене на электроэнергию. Планировщик методом двойственного разложения находит минимум и сообщает его каждому потребителю. Если суммарное потребление превышает порог, то делается еще итерация. В результате моделирования было установлено, что нагрузка на агент-планировщика растет линейно с ростом числа агентов-потребителей. В моделировании участвовали до 16 агентов.

Мультиагентная система SPADE была использована для моделирования работы smart grid на основе солнечных батарей также в работах [9, 10]. В работе [9] для оптимизации нагрузки на smart grid использовался генетический алгоритм. В работе [10] была предложена система из нескольких отдельных систем, каждая из которых управляет своей локальной smart grid. Таким образом, повышается отказоустойчивость всей системы и появляется возможность динамического распределения нагрузки.

В работе [11] рассматривается задача прогнозирования развития среднего по размеру города и связанного с этим роста потребления электроэнергии. Агенты делились на пассивные (участки под застройку, строящиеся дома, построенные дома, объекты социальной инфраструктуры) и активные агенты - потребители электроэнергии и покупатели недвижимости (которые, в свою очередь, делились на 3 возрастные группы с разными предпочтениями). При моделировании использовались реальные географические данные о застройке, стоимости недвижимости, расположении электрических сетей, плотности и составе населения. Активные агенты на основе своих предпочтений и стоимости предлагаемых объектов недвижимости приобретали участки под застройку или готовые дома. Это приводило к изменениям плотности и состава населения, что, в свою очередь, влекло за собой изменения в потреблении электроэнергии в разных районах города. Согласно данным из этой работы, мультиагентная система SPADE может эффективно работать с количеством агентов до 600, для большего количества производительность сильно уменьшается.

Таким образом, можно считать, что мультиагентная система SPADE представляет собой широко применяемое, удобное и надежное средство для программной реализации при решении различных задач в рамках агентного моделирования.

## 2. Формирование групп

Значительный практический интерес представляет задача формирования групп агентов. Согласно определению, данному в работе [12], формирование групп — это процесс объединения агентов в результате их взаимодействия для того, чтобы они совместно могли решать задачи, которые не могут решить индивидуальные агенты.

**Постановка задачи.** Формально, проблема формирования групп может быть определена следующим образом. Пусть имеется конечное множество агентов  $A$  и характеристическая функция  $f(A)$ , которая каждой группе (т.е. подмножеству агентов) из  $A$  ставит в соответствие числовое значение. Целью является разбиение множества агентов  $A$  на группы  $A_1, A_2, \dots, A_n$  таким образом, чтобы максимизировать суммарное значение характеристической функции для полученных групп  $\sum f(A_i) \rightarrow \max$  [13]. Особенность задачи разбиения множества агентов состоит в том, что их количество, состав и свойства могут изменяться во времени.

Значение характеристической функции для группы агентов можно рассматривать как меру желательности или выгоды от формирования этой группы. Свойства характеристической функции являются определяющими для решения задачи формирования групп. В случае если характеристическая функция супераддитивна, т. е.  $f(A_j \cup A_k) \geq f(A_j) + f(A_k)$ , то в результате сформируется одна большая коалиция, равная исходному множеству агентов  $A$ . Если характеристическая функция субаддитивна, т. е.  $f(A_j \cup A_k) \leq f(A_j) + f(A_k)$ , то в результате сформируются группы, состоящие каждая из одного агента. Поэтому для современных алгоритмов используются характеристические функции специального вида. Например, в работе [13] применяется класс функций вида  $f(A) = f^+(A) + f^-(A)$ , состоящих из супераддитивной ( $f^+$ ) и субаддитивной ( $f^-$ ) частей. Таким образом, на некотором этапе процесса формирования групп выгода от их объединения в одну становится отрицательной, что ограничивает количество агентов в каждой группе. Также является необходимым, чтобы значение характеристической функции зависело только от агентов, включенных в оцениваемую группу, и не зависело от других агентов, не вошедших в нее.

Для решения поставленной задачи разработаны подходы на основе полного перебора и приближенные. В последнее время активно развивается подход с использованием знаковой картины мира [1, 2]. Он основан на психологической модели когнитивной деятельности человека. Таким образом, группа агентов может быть образована на основе других критериев, например, с учетом общности интересов агентов или действий, которые они предпочитают выполнять или выполняют лучше других.

**Подходы на основе полного перебора.** Для нахождения оптимального решения задачи формирования групп было разработано большое количество алгоритмов. Например, был предложен алгоритм IDP, который в настоящее время де-факто является стандартом. Этот алгоритм использует специальное представление пространства поиска, которое разбивает его на подпространства так, что позволяет оценить верхнюю и нижнюю границы значений характеристической функции для лучших групп из этих подпространств. Полученные предварительные данные используются для отсекаания тех подпространств, в которых оптимальное решение получено быть не может. После этого алгоритм анализирует оставшиеся подпространства поиска методом ветвей и границ, также сокращая перебор. Даже будучи остановленным до достижения оптимального решения, алгоритм предоставляет результат, близкий к оптимальному [14].

В работе [15] предложено расширение алгоритма IDP, которое использует вычислительные мощности графического адаптера компьютера. Благодаря этому, улучшенный алгоритм работает на два порядка быстрее. Однако количество обрабатываемых агентов в работах [14, 15] не может превышать 30 из-за ограничений по памяти.

Еще один алгоритм, который позволяет увеличить количество обрабатываемых агентов, был предложен в работе [16]. Авторы используют понятие синергетического графа. Дуги в этом графе представляют некоторую связь между агентами, например, возможность к общению, доверие, физические ограничения. Коалиция между агентами, не имеющими соединительной дуги между ними, считается нецелесообразной и не рассматривается. Благодаря такому подходу, алгоритм способен к работе с 50 агентами [16].

В работе [17] исследована зависимость вычислительной сложности алгоритма формирования групп от вида различных синергетических графов. Были рассмотрены следующие топологии: линейный, циклический, дерево, дерево с ограничением по ширине, полносвязный. Также изучено влияние количества ребер, соединяющихся в узлах, на вычислительную сложность. Было установлено, что для линейных и циклических графов вычислительная сложность ниже.

**Приближенные подходы.** Для решения задачи формирования групп для числа агентов в несколько сотен или тысяч могут быть использованы только приближенные алгоритмы. В большинстве случаев агенты должны действовать максимально быстро, время для нахождения решения ограничено и нет времени для того, чтобы рассмотреть все возможные группы агентов, поэтому должно быть выбрано некоторое их перспективное подмножество. В работе [18] описан приближенный алгоритм, который за заранее установленное время либо способен найти решение, либо, будучи остановлен при превышении времени работы, получит решение, близкое к оптимальному. Для этой цели предлагается использовать стохастический локальный поиск. Основным достоинством этого метода является то, что он позволяет не рассматривать все возможные группы, количество которых растет экспоненциально. Метод основан на последовательном объединении полученных групп агентов. Также могут применяться и другие операции: разбиение группы на две подгруппы, обмен парой агентов между двумя группами и случайный поиск. Случайный поиск позволяет избежать попадания в локальный максимум, однако нахождение глобального оптимального решения не гарантируется. Скорость нахождения решения для 27 агентов оказалась на 6 порядков выше, чем у алгоритма IDP [18].

Недавно разработанный алгоритм C-Link [13] основан на использовании так называемой функции взаимозависимости, которая определяет выгоду от объединения двух выбранных групп. На первом шаге работы алгоритма группами являются каждый из агентов. Затем на каждом шаге определяются две группы, которые дают наибольший выигрыш при объединении их в одну. Эти группы объединяются, и процесс повторяется. Алгоритм останавливается, когда не удастся найти кандидатов на объединение. Важной особенностью этого алгоритма является то, что в случае его остановки до окончания работы, полученный результат будет лучше, чем начальное разбиение.

В работе [12] рассматривается алгоритм формирования групп агентов применительно к задаче доставки посылок. Был рассмотрен процесс объединения агентов, которые, возможно, имеют несовпадающие цели, в группы для улучшения их коллективных возможностей.

Основные вопросы для каждого из агентов: нужно ли сформировать группу для выполнения задания, или нужно действовать в одиночку, как выбрать группу, максимально подходящую для выполнения поставленной задачи, может ли агент доверять другим агентам из этой группы и т.д. Рассматривается набор агентов, которые должны доставить почтовые посылки по указанным адресам. За каждую доставленную посылку агент получает награду. Агенты неоднородны, они имеют различные значения атрибутов: честность, память, скорость, доверие. Агенты перемещаются по прямоугольной сетке, и при встрече в ее узлах с другим агентом задают себе следующие вопросы:

- Встречался ли я с этим агентом раньше? Каково мое мнение о нем?
- Состою ли я в группе с этим агентом?
- Нужно ли пригласить этого агента во все группы, в которых я состою?
- Нужно ли мне присоединиться к группам, в которых состоит этот агент?
- Нужно ли мне сформировать новую группу с этим агентом?
- Нужно ли мне просить нового агента о помощи с моими целями? (Этот вопрос задается только в том случае, если агенты теперь входят в одну группу).

В результате ответов на поставленные вопросы каждый агент принимает решение, будет ли он взаимодействовать с другими, и, если будет, то в рамках существующей или новой коалиции.

**Подход на основе знаковой картины мира.** Основным понятием в этом подходе является знак – именованная структура, хранящая декларативные и процедурные знания об объекте или процессе. В состав знака входят: образ (существенные признаки, характеризующие описываемый объект или процесс), значение (обобщенные знания о внешней среде и о возможных методах использования объектов) и личностный смысл (информация об индивидуальном опыте взаимодействия с объектом, как удачном, так и неудачном). Модель знаковой картины мира состоит из четырех элементов: знаков, которые представляют все внешние сущности и внутренний мир объекта; объектов и их свойств; процессов; отношений между объектами и процессами. Модель также имеет методы для приобретения и управления знаниями и использования знаний в различных процессах, таких как обоснование, установка целей

и планирование поведения. Предложенный подход был применен для решения задачи распределения ролей в коалиции когнитивных агентов [19].

Большинство описанных в литературе алгоритмов формирования групп агентов решают статическую задачу в замкнутых условиях, т. е. количество агентов и свойства каждого агента заданы заранее и не изменяются во время поиска решения. При решении задачи формирования групп агентов в динамических и открытых условиях широко используются мультиагентные системы, позволяющие моделировать такие, более близкие к реальным, условия [20]. Во время моделирования агенты могут появляться и исчезать, приобретать или изменять собственные свойства и выполняемые действия, покидать или вступать в сформированные группы.

Подход на основе знаковой картины имеет механизмы для планирования поведения, обобщения, приобретения новых свойств. Агенты, созданные с использованием знакового подхода, по сравнению с разработанными ранее и описанными в литературе агентами, обладают большей интеллектуальностью, адаптивностью и автономностью. Благодаря тому, что в знаковом подходе имеется механизм личностных смыслов, созданные агенты могут выбирать действия, которые они предпочитают выполнять или выполняют лучше по сравнению с другими агентами. Использование личностных смыслов также позволяет моделировать приобретение опыта агентами в результате выполнения действий, улучшение уже имеющихся или приобретение новых навыков.

Существенным требованием является возможность работы с большим количеством агентов и хорошая масштабируемость при увеличении их числа. Пример приближенного решения задачи формирования групп агентов на основе мультиагентной системы SPADE приведен ниже.

### 3. Модельная задача

Работа алгоритма формирования групп агентов изучалась на примере следующей задачи. Имеется два основных типа агентов — грузовики (Truck) и фабрики (Factory) и вспомогательный агент — таймер (Timer). Время является дискретным, о наступлении новой итерации всем агентам сообщает агент-таймер.

Агенты-фабрики имеют следующие данные: координаты местоположения, вес необходимого сырья и признак, сообщающий, что фабрика получила нужное количество сырья и запущена. Агенты-грузовики имеют координаты, скорость передвижения и вес перевозимого сырья.

Грузовики, перемещаясь по некоторой дорожной сети, доставляют сырье на фабрики. Для запуска каждой фабрики требуется количество сырья в объеме большем, чем может перевезти каждый грузовик. Фабрика считается запущенной, если к ней одновременно прибывают грузовики с суммарным количеством сырья, равным или превышающим потребность. Оставшиеся у грузовиков излишки сырья могут быть использованы для запуска следующей фабрики. Требуется запустить максимальное число фабрик, вторичной целью является минимизация пробега всех грузовиков. Процесс моделирования останавливается, когда суммарное количество сырья, имеющееся у всех грузовиков, недостаточно для запуска ни одной фабрики.

Был разработан и реализован жадный алгоритм для формирования групп агентов в мультиагентной системе SPADE. Агент-грузовик, имеющий сырья больше, чем остальные грузовики, формирует группу для запуска ближайшей к нему фабрики. Если такую группу удастся сформировать, то выбирается следующий свободный максимально загруженный агент-грузовик и процесс повторяется. Более подробно алгоритм описан в работе [6].

Были получены экспериментальные данные о зависимости количества переданных сообщений и времени, затраченного на формирование всех групп, от количества агентов-грузовиков и агентов-заводов. Позиции и потребность в сырье агентов-заводов, а также координаты и вес имеющегося сырья агентов-грузовиков были сгенерированы случайным образом. Эксперименты проводились на компьютере Intel Core i5 - 2,6 GHz, 4 Gb RAM, Win7. Количество агентов-заводов было 5, 10 или 20, количество агентов-грузовиков — 20, 50 или 100. Установлено, что для пяти заводов и 20 грузовиков потребовалось 25 сообщений и 0,2 секунды, для 20 заводов и 100 грузовиков — 378 сообщений и 307 секунд. Обнаружено, что количество сообщений сравнительно невелико, что можно объяснить возможностью системы SPADE пересылать сообщения нескольким получателям

одновременно. Полученные данные свидетельствуют о том, что созданная программная система может быть дополнена более сложным алгоритмом формирования групп, использующим знаковую картину мира агентов.

Использование знаковой картины в рамках модельной задачи означает, что каждый агент-грузовик имеет набор действий, упорядоченных по их предпочтительности для данного агента. Этот набор действий хранится в структурах личного смысла каждого агента. С каждым из действий связано числовое значение  $v_j(r)$  – успешность выполнения действия  $r$  агентом  $j$ . Это значение можно рассматривать как вероятность успешного выполнения выбранного действия конкретным агентом. Кроме того, агент-координатор для каждого агента-исполнителя имеет числовое значение  $\Omega_j$  – собственную оценку надежности или добросовестности агента  $j$  при выполнении выданных ему заданий. Общая оценка успешности выполнения конкретным агентом выбранного действия вычисляется как произведение этих оценок  $N_j = \Omega_j \cdot v_j(r)$  [21].

При решении задачи главный агент-координатор строит план решения, после чего на каждом шаге плана выбирает одного или нескольких наиболее подходящих агенто-грузовиков на основе общей оценки  $N$  успешности выполнения этими агентами текущего действия из плана. Поскольку личные смыслы формируются в результате взаимодействия агентов друг с другом и со средой, то в результате выполнения заданий личные смыслы агентов могут меняться. Несмотря на то, что модель знаковой картины мира имеет механизмы для изменения состава действий, входящих в личные смыслы агентов, в настоящей работе считается, что состав действий в личных смыслах каждого агента установлен заранее и не приобретает/удаляется в процессе выполнения действий. В результате выполнения плана изменяются только значения успешности выполненного действия для агентов и оценка надежности этих агентов агентом-координатором. Таким образом, для формирования группы агентов на основе их знаковой картины мира на каждом шаге плана требуется опрашивать агентов об их личных смыслах и успешности выполнения действий, т.е. предпочитаемых ими в данный момент действиях. Диаграмма последовательности этого процесса приведена на Рис. 1.

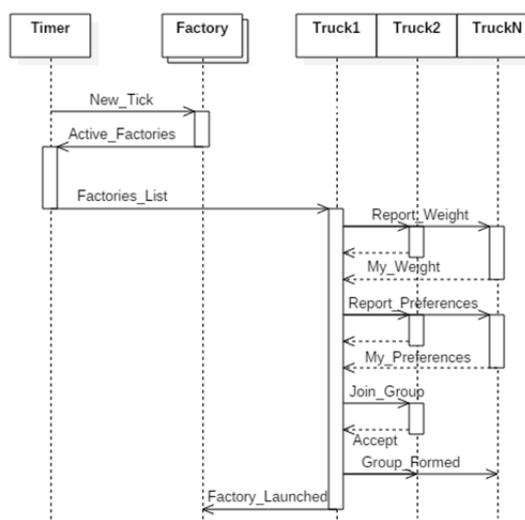


Рис. 1. Диаграмма последовательности процесса формирования группы агентов

Возможен децентрализованный вариант, при котором агенты строят свои индивидуальные планы и после этого согласовывают их между собой, получая единый план действий.

## Заключение

В работе рассмотрены различные подходы к решению задачи формирования групп агентов. Создана программная реализация жадного алгоритма на основе мультиагентной системы SPADE. Результаты экспериментов показывают, что возможности мультиагентной системы

SPADE позволяют применить и более сложный алгоритм формирования групп агентов, базирующийся на знаковой картине мира агентов. Формирование групп агентов может быть децентрализованным (в этом случае каждый агент строит собственный план решения задачи, и эти планы агенты согласуют между собой в единый план действий) и централизованным, когда главный агент-координатор строит единый план и для выполнения каждого его шага выбирает одного или нескольких наиболее подходящих агентов.

## Литература

1. Осипов Г.С., Панов А.И., Чудова Н.В. Управление поведением как функция сознания. I. Картина мира и целеполагание // Известия РАН. 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 РАН. Теория и системы управления. 2015. № 6. С. 47–61.
3. Gregori, M.E., Camara, J.P., Bada, G.A. A jabber-based multi-agent system platform // Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. 2006. P. 1282-1284.
4. Bellifemine, F., Poggi, A., Rimassa, G. JADE—A FIPA-compliant agent framework // Proceedings of PAAM. 1999. P. 97-108.
5. Amato, A., Di Martino, B., Scialdone, M., Venticinque, S. Design and evaluation of P2P overlays for energy negotiation in smart micro-grid // Computer Standards & Interfaces. 2016. № 44. P. 159-168.
6. Goryashchenko, A. Algorithm and Application Development for the Agents Group Formation in a Multi-agent System Using SPADE System. // Future of Information and Communication Conference. 2019. LNNS № 70, P. 1136–1143.
7. Such, J.M., Alberola, J.M., Mulet, L., Espinosa, A., Garcia-Fornes, A., Botti, V. Large-scale multiagent platform benchmarks // LADS. 2007. P. 192-204.
8. Iacovella, S., Vingerhoets, P., Deconinck, G., Honeth, N., Nordstrom, L. Multi-Agent platform for Grid and communication impact analysis of rapidly deployed demand response algorithms // 2016 IEEE International Energy Conference. 2016. P. 1-6.
9. Monteiro, J., Eduardo, J., Cardoso, P. J., Semiao, J. A distributed load scheduling mechanism for micro grids // 2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications. 2014. P. 278-283.
10. Jiang, S., Venticinque, S., Horn, G., Hallsteinsen, S., Noebels, M. A distributed agent-based system for coordinating smart solar-powered microgrids // 2016 SAI Computing Conference. 2016. P. 71-79.
11. Pijoan, A., Kamara-Esteban, O., Borges, C. E. Environment modelling for spatial load forecasting // Agent Environments for Multi-Agent Systems IV. 2015. P. 188-206.
12. Van De Vijssel, M., Anderson, J. Coalition formation in multi-agent systems under real-world conditions // Proceedings of association for the advancement of artificial intelligence. 2004. P. 54-60.
13. Farinelli, A., Bicego, M., Ramchurn, S.D., Zucchelli, M. C-Link: A Hierarchical Clustering Approach to Large-scale Near-optimal Coalition Formation // IJCAI. 2013. P. 106-112.
14. Rahwan, T., Ramchurn, S.D., Jennings, N.R., Giovannucci, A. An anytime algorithm for optimal coalition structure generation // Journal of Artificial Intelligence Research. 2009. № 34. P. 521-567.
15. Pawlowski, K., Kurach, K., Svensson, K., Ramchurn, S.D., Michalak, T.P., Rahwan, T. Coalition structure generation with the graphics processing unit // Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2014. P. 293-300.
16. Voice, T., Ramchurn, S.D., Jennings, N.R. On coalition formation with sparse synergies // Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. 2012. Vol. 1. P. 223-230.
17. Chalkiadakis, G., Greco, G., Markakis, E. Characteristic function games with restricted agent interactions: core-stability and coalition structures // Artificial Intelligence. 2016. № 232. P. 76-113.
18. Di Mauro, N., Basile, T.M., Ferilli, S., Esposito, F. Coalition structure generation with GRASP // International Conference on Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications. 2010. P. 111-120.
19. Киселев Г.А., Панов А.И. Знаковый подход к задаче распределения ролей в коалиции когнитивных агентов // Труды СПИИРАН. 2018. № 57. С. 161–187.
20. Klusch, M., Gerber, A. A Dynamic Coalition Formation Scheme for Rational Agents // IEEE Intelligent Systems. 2002. P. 42–47.
21. Осипов Г.С. Целенаправленное поведение коалиции когнитивных агентов // Гибридные и синергетические интеллектуальные системы // Сб. материалов IV Всерос. конф. Калининград. 2018. С. 81–85.

## Using of Multi-Agent System for Solving Agents Group Formation Problem

A. S. Goryashchenko

Federal Research Center "Computer Science and Control" of RAS, Moscow, Russia

**Abstract.** A problem of agents group formation in multi-agent systems is discussed in this paper. SPADE multi-agent system is chosen after evaluation of its performance and scalability for several hundreds of agents. Several approaches to agents group formation problem are discussed. A greedy algorithm for agents group formation is implemented using SPADE multi-agent system and its properties are studied. It is established that SPADE multi-agent system characteristics are sufficient for implementation of more complex algorithms for agents group formation. Ways to incorporate cognitive agents with sign world model in developed system are proposed.

**Keywords:** Agents and multi-agent systems, SPADE multi-agent system, agent group formation.

DOI 10.14357/20718594190408

## References

1. Osipov G.S., Panov A.I., Chudova N.V. Upravleniye povedeniyem kak funktsiya soznaniya. I. Kartina mira i tselepolaganiye [Behavior Control as a function of consciousness. I. World model and goal setting]. // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravleniya – Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2014. vol. 4. pp. 517–529.
2. Osipov G.S., Panov A.I., Chudova N.V. Upravleniye povedeniyem kak funktsiya soznaniya. II. Sintez plana povedeniya [Behavior Control as a Function of Consciousness. II. Synthesis of a Behavior Plan]. // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teorija i sistemy upravleniya – Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2015. vol. 6. pp. 882–896.
3. Gregori, M.E., Camara, J.P., Bada, G.A. A jabber-based multi-agent system platform // *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*. 2006. P. 1282-1284.
4. Bellifemine, F., Poggi, A., Rimassa, G. JADE–A FIPA-compliant agent framework // *Proceedings of PAAM*. 1999. P. 97-108.
5. Amato, A., Di Martino, B., Scialdone, M., Venticinque, S. Design and evaluation of P2P overlays for energy negotiation in smart micro-grid // *Computer Standards & Interfaces*. 2016. № 44. P. 159-168.
6. Goryashchenko, A. Algorithm and Application Development for the Agents Group Formation in a Multi-agent System Using SPADE System. // *Future of Information and Communication Conference*. 2019. LNNS № 70, P. 1136–1143.
7. Such, J.M., Alberola, J.M., Mulet, L., Espinosa, A., Garcia-Fornes, A., Botti, V. Large-scale multiagent platform benchmarks // *LADS*. 2007. P. 192-204.
8. Iacovella, S., Vingerhoets, P., Deconinck, G., Honeth, N., Nordstrom, L. Multi-Agent platform for Grid and communication impact analysis of rapidly deployed demand response algorithms // *2016 IEEE International Energy Conference*. 2016. P. 1-6.
9. Monteiro, J., Eduardo, J., Cardoso, P. J., Semiao, J. A distributed load scheduling mechanism for micro grids // *2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. 2014. P. 278-283.
10. Jiang, S., Venticinque, S., Horn, G., Hallsteinsen, S., Noebels, M. A distributed agent-based system for coordinating smart solar-powered microgrids // *2016 SAI Computing Conference*. 2016. P. 71-79.
11. Pijoan, A., Kamara-Esteban, O., Borges, C. E. Environment modelling for spatial load forecasting // *Agent Environments for Multi-Agent Systems IV*. 2015. P. 188-206.
12. Van De Vissel, M., Anderson, J. Coalition formation in multi-agent systems under real-world conditions // *Proceedings of association for the advancement of artificial intelligence*. 2004. P. 54-60.
13. Farinelli, A., Bicego, M., Ramchurn, S.D., Zucchelli, M. C-Link: A Hierarchical Clustering Approach to Large-scale Near-optimal Coalition Formation // *IJCAI*. 2013. P. 106-112.
14. Rahwan, T., Ramchurn, S.D., Jennings, N.R., Giovannucci, A. An anytime algorithm for optimal coalition structure generation // *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2009. № 34. P. 521-567.
15. Pawlowski, K., Kurach, K., Svensson, K., Ramchurn, S.D., Michalak, T.P., Rahwan, T. Coalition structure generation with the graphics processing unit // *Proceedings of the 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*. 2014. P. 293-300.
16. Voice, T., Ramchurn, S.D., Jennings, N.R. On coalition formation with sparse synergies // *Proceedings of the 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. 2012. Vol. 1. P. 223-230.
17. Chalkiadakis, G., Greco, G., Markakis, E. Characteristic function games with restricted agent interactions: core-stability and coalition structures // *Artificial Intelligence*. 2016. № 232. P. 76-113.
18. Di Mauro, N., Basile, T.M., Ferilli, S., Esposito, F. Coalition structure generation with GRASP // *International Conference on Artificial Intelligence: Methodology, Systems, and Applications*. 2010. P. 111-120.
19. Kiselev G.A., Panov A.I. Znakovyy podkhod k zadache raspredeleniya roley v koalitsii kognitivnykh agentov [Sign-based Approach to the Task of Role Distribution in the Coalition of Cognitive Agents]. // *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2018. Issue 2(57). P. 161–187.
20. Klusch, M., Gerber, A. A Dynamic Coalition Formation Scheme for Rational Agents // *IEEE Intelligent Systems*. 2002. P. 42–47.
21. Osipov G.S. Tselenapravlennoe povedenie koalitsii kognitivnykh agentov [Goal-directed behavior of cognitive agents' coalitions] // *Gibridnye i sinergeticheskei intellektual'nye sistemy: sb. mater. IV Vseross. konf. Kaliningrad – Hybrid and synergetic intellectual systems: Proceedings of IV All-Russian conference Kaliningrad*, 2018. P. 81–85.