

Модели формирования коалиций между кооперативными агентами: состояние и перспективы исследований¹

Аннотация. В статье проанализированы основные подходы к построению моделей формирования коалиций между рациональными кооперативными агентами. Построена таксономия работ в этой стремительно развивающейся области междисциплинарных исследований и, на основе опыта авторов, сравниваются различные подходы с точки зрения их применимости в реальных приложениях. Особое внимание уделяется моделям теории кооперативных игр.

Ключевые слова: формирование коалиций, кооперативные агенты, теория игр.

Введение

Сложные открытые системы принято рассматривать как совокупность связанных сущностей (или заинтересованных агентов), которые способны приспосабливаться к изменениям, как в окружающей среде, так и в самой системе сущностей. Одной из форм адаптации является самоорганизация. Особенно это характерно для динамических систем, в которых агенты могут свободно входить в систему и выходить из нее, а также менять свои характеристики [30]. Примером таких систем могут служить адаптивные цепи поставок, в которых реализуются принципы динамического реконfigurирования сети при реализации спрос-ориентированных, гибких бизнес-стратегий управления [52]. В этих случаях статическая организация не обеспечивает оптимального функционирования систем и уступает место механизмам самоорганизации, одним из которых является формирование коалиций между агентами.

Понятие коалиции широко используется применительно к организационным системам. Под коалицией понимают общество заинтере-

сованных агентов, которые на основании протоколов переговоров принимают решение сотрудничать, чтобы решить некую задачу или достигнуть определенной цели [20]. Развитие этого понятия в многоагентных системах (МАС) сводится не только к разработке теоретических аспектов кооперативных систем, а представляет собой способ создавать виртуальные организации агентов посредством применения согласованных стратегий, временная логика которых зависит от динамически меняющихся условий [24]. Формирование коалиций позволяет:

- расширить индивидуальных возможности агентов по решению задач, повысить качество их выполнения, тем самым позволяя достигать синергетического эффекта [45, 47];
- упростить организацию и координацию в МАС, а также снизить сложность процесса коммуникации при переходе от взаимодействия между агентами к взаимодействию коалиций [8, 21, 38];
- использовать структуру предметной области, так как каждой подобласти может быть поставлена в соответствие коалиция, объеди-

¹ Работа выполнена в рамках проектов: FP6-IST-NMP 507592-2 "ILIPT", спонсированный Европейской комиссией; Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 10-08-90027 и № 11-07-00045) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Интеллектуальные информационные технологии, математическое моделирование, системный анализ и автоматизация".

няющая ее членов. Кроме того, связи между коалициями являются следствием той же онтологической модели, которая описывает предметную область;

- моделировать динамику МАС, когда в силу изменений окружающей среды, агенты должны быстро на них реагировать, чтобы перестроиться и приспособиться к новым окружающим условиям, включая необходимость действовать в условиях непредвиденных или эмерджентных сценариев, эффективно используя при этом свои ресурсы и возможности общения.

В контексте МАС принято говорить о среде формирования коалиций, построение которой представляет собой важную задачу с точки зрения использования подхода в реальных приложениях. Эта среда описывается набором допущений и ограничений, определяющих поведение агента и рациональность принимаемых им решений при формировании коалиций. В общем случае определим среду формирования коалиций как совокупность целей, действий и методов определения индивидуальных предпочтений, ценности коалиций, коалиционных структур и конфигураций. Учитывая наличие различных подходов к построению устойчивых коалиций, агенты, принадлежащие определенной предметной области, должны согласовать тип устойчивых коалиций, который будет использован в договорном процессе, и алгоритм переговоров, называемый коалиционным алгоритмом. Другими словами, в рамках среды все агенты гомогенны. В свою очередь коалиционный алгоритм определяется принятой моделью поиска устойчивых решений (в кооперативных играх – это понятия ядра, устойчивого множества, индекса Шепли, т.д.). В общем случае среда и коалиционный алгоритм определяют модель формирования коалиций.

Долгое время в рамках МАС основное внимание уделялось алгоритмам распределенного формирования коалиций [28, 29, 31, 33, 42, 47]. Действительно, эти алгоритмы органично вписываются в концепцию многоагентных систем, состоящих из независимых заинтересованных агентов. С другой стороны, распределенные алгоритмы позволяют уменьшить комбинаторную сложность вычислений. Вместе с тем, как показывает практика, распределенные модели также не лишены серьезных недостатков и в первую очередь, это сложность коммуникаций. В связи с этим с учетом появления новых методов ре-

шения задач (например, генетических алгоритмов), видится рациональным уделить внимание также методам, разрабатываемым в рамках теории кооперативных игр, которые, применительно к МАС, сочетают особенности обоих подходов: централизованный коалиционный алгоритм и распределенную среду построения и поиска решений [12, 15, 48, 49].

Статья построена следующим образом. В следующих двух разделах приведена постановка задачи формирования коалиций в многоагентной среде и рассмотрена основная проблематика данной области исследований. С целью анализа состояния исследований в области коалиционных систем в разделе 3 построена таксономия подходов к формированию коалиций, которая позволяет классифицировать существующие подходы по ряду основных признаков. В отдельную группу выделены модели, разрабатываемые в теории кооперативных игр, которые анализируются в разделе 4. Наконец, в заключении выделены основные требования к моделям формирования коалиций с точки зрения реальных приложений и намечены перспективы дальнейших исследований с целью разработки моделей, удовлетворяющих данным требованиям.

1. Задача формирования коалиций

Основными компонентами задачи формирования коалиций (ЗФК) являются *задача*, *агент* и *коалиция*. Пусть дано конечное множество задач $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, где каждая задача T_i ($i=1, 2, \dots, m$) связана с вектором численных значений размерности r , $B_{T_i} = (b_{T_i}^1, b_{T_i}^2, \dots, b_{T_i}^r)$, $b_{T_i}^j \geq 0, j=1, 2, \dots, r$, характеризующим компетенции, необходимые для ее решения. За выполнение задачи причитается вознаграждение $Payoff(T_i)$. Пусть дано конечное множество агентов $Agent = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, обладающих определенными способностями по выполнению задач. Тогда, по аналогии с задачами, каждый из агентов $k \in Agent$ ($k=1, 2, \dots, n$) имеет связанный вектор способностей размерности r : $B_k = (b_k^1, b_k^2, \dots, b_k^r)$, $b_k^j \geq 0, j=1, 2, \dots, r$, соответствующий компетенциям, необходимым для решения задачи.

Под *коалицией* будем понимать группу агентов, объединенных для выполнения задачи T_i .

Каждая коалиция описывается кортежем: $\langle K_{T_i}, alloc_{T_i}, u_{T_i} \rangle$, где $K_{T_i} \subseteq Agent$ и $K_{T_i} \neq \emptyset$. $alloc_{T_i}$ - функция назначения, ставящая каждой компетенции j в соответствие группу из m агентов, такая, что $alloc_{T_i} = K_{T_i}$, если $\sum_m b_m^j \geq b_{T_i}^j$. В

простейшем случае, если для всех компетенций, соответствующих задаче T_i , выполняется $b_k^j \geq b_{T_i}^j$, K_{T_i} может состоять из одного агента $k \in K_{T_i}$, тогда $alloc_{T_i} = k$. Полезность коалиции определяется характеристической функцией: $v(K_{T_i}) = Payoff(T_i) - \sum_k \sum_j f_{T_i}(b_k^j) \cdot \varphi(T_i, k, j)$,

где φ - бинарная переменная, определяющая факт участия агента в выполнении задачи по компетенции b_k^j :

$$\varphi(T_i, k, j) = \begin{cases} 1, & \text{если агент выполняет } b_k^j \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Полезность коалиции $v(K_{T_i})$ распределяется между участниками на основе вектора распределения платежей $u_{T_i} = \{u_{T_i}^1, u_{T_i}^2, \dots, u_{T_i}^{|K_{T_i}|}\}$, где $u_{T_i}^k$ - платеж агенту $k \in Agent$, а последний элемент вектора, $u_{T_i}^{|K_{T_i}|}$ - платеж коалиции. Если в рамках коалиции K_{T_i} агент k предоставляет различные способности, то выполняется: $u_{T_i}^k = \sum_j g_k(b_{T_i}^j)$, $g_k(b_{T_i}^j) = \frac{b_{T_i}^j}{\sum_{l=1}^r b_{T_i}^l} v(K_{T_i}) \cdot \varphi(T_i, k, j)$.

2. Проблематика формирования коалиций

Решение ЗФК заключается в нахождении такой структуры коалиций, которая обеспечивала бы соответствующее распределение платежей, позволяющее максимизировать выигрыш каждого агента с учетом удовлетворения ограничений. Таким образом, формирование коалиций включает три типа взаимосвязанных действий:

- генерирование структуры коалиций, т.е. такого образования, в котором агенты внутри каждой коалиции координируют свою деятельность;

- решение проблемы оптимизации каждой коалиции, т.е. объединение способностей агентов для эффективного решения задач;

- распределение прибыли между агентами.

В процессе формирования коалиций в контексте MAC необходимо принимать во внимание следующее:

- агенты функционируют в кооперативных средах, т.е. стремятся к достижению общей цели или выполняют общее задание, посредством его разбиения на взаимосвязанные подзадачи (решаемые коалициями), в которых не существует агентов или некой центральной инстанции, ответственной за планирование и координацию действий. Наоборот, индивидуальные агенты ищут коалиции, которые удовлетворяли бы их интересам (в терминах моделей BDI - убеждениям, желаниям, намерениям [35], ожиданиям платежей, и т.д.). Кроме этого, эти группы образуются в результате согласия агентов сотрудничать. Этот децентрализованный механизм самоорганизации соответствует распределенной природе MAC;

- выгода, распределяемая между агентами, соответствует платежам для индивидуальных агентов, коалиций агентов и коалиции всех агентов, называемой «большой коалицией». Ее рациональное распределение является результатом решения проблемы формирования коалиций. Эти платежи могут быть строгими, вероятностными или нечеткими в зависимости от того, является ли система детерминированной, случайной или неопределенной. Эти платежи могут быть: передаваемыми или трансферабельными (пропорциональными или удовлетворяющими линейной функции принадлежности); не трансферабельными; универсальными (описываемыми общей функцией принадлежности в течение процесса формирования структуры коалиций) или не универсальными.

- полученные структуры коалиций должны быть эффективными в том смысле, что никакая коалиция, принадлежащая структуре, не может быть заменена другой более привлекательной коалицией с точки зрения распределения выигрышей среди агентов.

3. Таксономия моделей формирования коалиций

Существует большое количество классификаций моделей формирования коалиций.

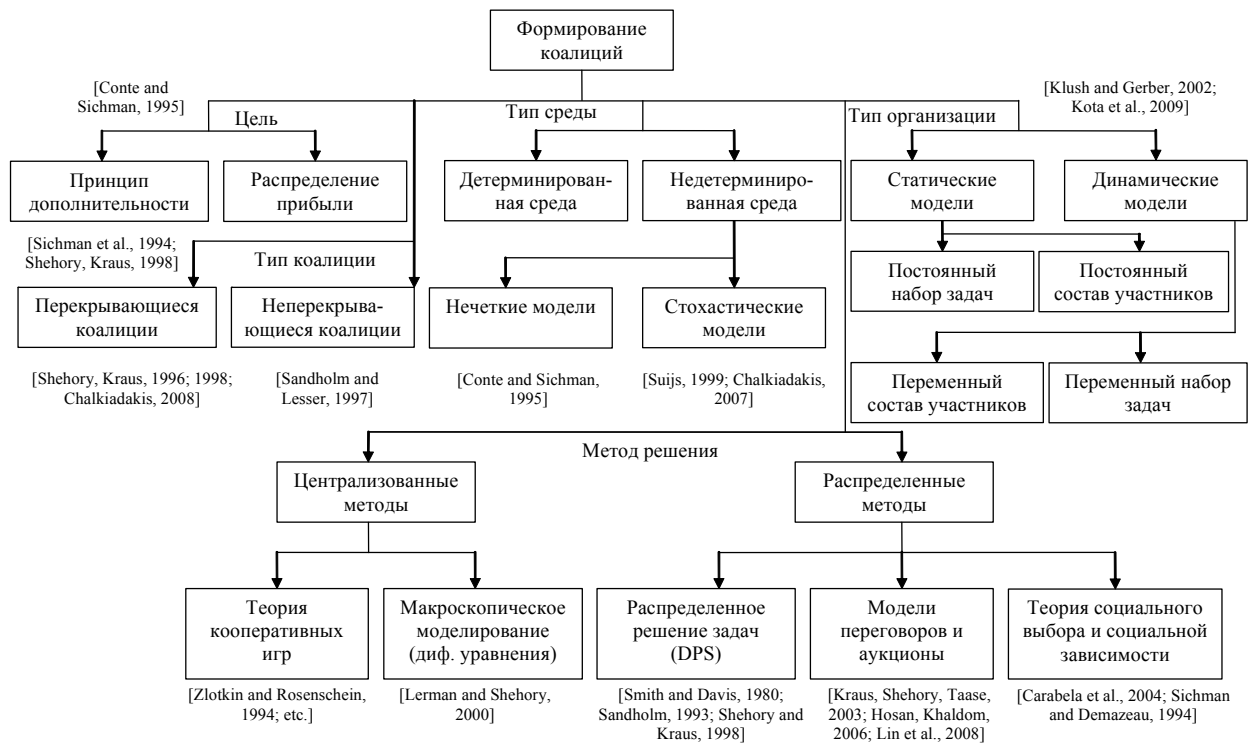


Рис. 1. Классификация методов и моделей формирования коалиций по типам моделей и среды.

Обобщенная структура исследований в этой области приведена на Рис. 1. Классификация построена на основе учета следующих классификационных признаков: цель формирования коалиции, тип коалиций, тип среды, тип организации и метод решения.

Начнем с цели формирования коалиций. По этому признаку выделяют два основных типа моделей образования коалиций: модели, основанные на прибыли, и модели, основанные на принципе дополнительности [14]. Первый тип моделей соответствует классическим методам и протоколам формирования устойчивых равновесных коалиций, которые руководствуются принципом “*bellum omnium contra omnes*” («война всех против всех»), и изучаются в теории игр и исследовании операций [31, 56]. Модели данного типа решают две основные взаимосвязанные задачи: формирование структуры коалиций и распределение выигрыша между участниками. Полученное решение называется *конфигурацией коалиций*. Модели этого типа мы рассмотрим более подробно в следующем подразделе. Модели второго типа основаны на использовании дополнительных возможностей агентов с целью увеличения их коллективного потенциала по достижению своих целей.

По принципу построения и нахождения решения методы формирования коалиций могут быть условно разделены на централизованные и распределенные.

3.1. Модели централизованного и распределенного формирования коалиций

Основное отличие между централизованными и распределенными методами состоит в том, что для централизованных методов характерно наличие некоего центрального решателя (как в случае кооперативных игр или моделей, в основе которых лежит построение системы дифференциальных уравнений), тогда как в основе распределенного формирования коалиций лежит некий алгоритм переговоров.

Приемы и методы поиска решения задач, которые не могут быть решены централизованно или процесс решения которых предполагает наличие нескольких, независимых друг от друга участников, начали разрабатываться в рамках кооперативного распределенного решения проблем (*Cooperative Distributed Problem Solving – CDPS*) [17, 53]. Особенностью этого подхода, однако, является так называемая *беневоленность* (доброжелательность) агентов,

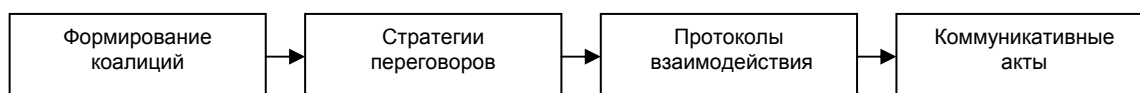


Рис. 2. Многоуровневая структура взаимодействия агентов в процессе формирования коалиций

которая является проявлением основного свойства систем данного класса: полной кооперативности образующих их агентов. Учитывая, что нас интересует процесс создания коалиций как механизм самоорганизации кооперативных, но заинтересованных агентов (имеющих порой противоречивые цели), не будем останавливаться подробно на анализе этого направления.

Развитием *CDPS* стали многочисленные методы формирования коалиций, основанные на использовании стратегии переговоров (Рис. 2) [34]. Примером стратегий переговоров может служить алгоритм принятия решений о предложении цены и вознаграждения на основе вычисления маргинальной стоимости, который реализован в кооперативной транспортной сети TRACONET (TRAnspiration COoperation NET) [40]. Стратегии переговоров используют протоколы взаимодействия агентов, которые являются логическими транзакциями между взаимодействующими агентами и строятся из коммуникативных актов (перформативов) языка взаимодействия агентов ACL (Agent Communication Language). Протоколы взаимодействия позволяют строить диалоги между агентами. Для конструирования протоколов взаимодействия (например, таких как протокол запросов FIPA-request или Контрактная Сеть - Contract Net) используются стандартные перформативы FIPA ACL, например «Inform» и «Request». В процесс переговоров вырабатывается согласованное решение по параметрам выполнения заказа. В качестве обратной связи используется высказанная агентом возможность и обязательство выполнить запрошенное действие в данном внутреннем состоянии с учетом его личной заинтересованности.

В [32] авторами разработан протокол, позволяющий переговариваться при формировании коалиций с использованием простых эвристических правил выбора партнеров. Однако, когда две и более коалиции одновременно посылают свои предложения, метод не позволяет достигнуть глобально оптимальной коалиции, временами приводя к блокированию процесса. Другим недостатком этого метода является то,

что агент в каждом раунде переговоров может сделать только один ход, что уменьшает вероятность формирования оптимальной коалиции.

В МАС достаточно часто ставится задача формирования коалиций с целью решения некой задачи, состоящей из подзадач, последовательно или параллельно выполняемых различными агентами в заданном порядке. Примером задач данного типа являются задачи конфигурирования производственной сети, определяемой технологическим процессом производства изделия. Постановка данной задачи как задачи о назначениях рассмотрена в [45, 47]. Учитывая, что задача о назначениях является NP-полной², с целью уменьшения ее сложности на задачу формирования коалиций накладывается ряд ограничений (на возможности агента, последовательность задач, ошибку между субоптимальным и оптимальным решениями), а также фиксируется число возможных коалиций [41]. Введение таких ограничений зачастую влияет на практическую применимость моделей.

В [23] предложена стратегия формализации выбора подзадач как Марковского процесса принятия решений, построенная на основе аукционов. Несмотря на очевидные достоинства, при использовании метода аукционов агенты не могут контролировать в достаточном объеме потребление ресурсов, а процесс формирования коалиций носит последовательный характер и не может быть распространен на области, в которых необходима параллельность и многозадачность. В развитие данного подхода в [25] рассмотрена параллельная многозадачная стратегия решения и теоретически обосновано, что процесс многозадачного формирования коалиций может быть представлен как Марковский процесс принятия решений. Обучение с подкреплением используется для построения стратегии поведения агента в процессе эффективного параллельного формирования многозадачных коалиций. Однако для определения оптимальной коалиции для выполнения каждой задачи и распределения ценностей между агентами использован специальный мо-

² В теории сложности, задачи недетерминированного полиномиального времени решения.

дуль, что позволяет говорить о смешанной (распределенной и централизованной, требующей знаний о глобальном состоянии системы) стратегии данного метода.

Наконец, модели теории социального выбора относятся к классу моделей, основанных на принципе дополнителности [10, 50, 51]. В них исследуются аспекты социального поведения агентов при определении предпочтений формирования групп и коалиций в зависимости от степени взаимной зависимости. Так называемый «механизм социального вывода», позволяющий агентам рассуждать о своих возможных партнерах, строится на основе наличия внешнего описания каждого агента. Такое внешнее описание можно рассматривать как профиль агента. Механизм вывода основан на модели ментальных состояний агентов BDI [35].

Основным подходом к централизованному формированию коалиций является теория кооперативных игр, основные модели которой будут рассмотрены в отдельном разделе. Сюда также можно отнести так называемые макроскопические модели, способные масштабироваться на большие колонии агентов (как электронный рынок). Данный подход сводится к поиску механизмов меньшей сложности. При этом исследуется сам процесс формирования коалиций на основе набора локальных взаимодействий между агентами, описываемый системой дифференциальных уравнений [33].

Основными недостатками подходов, использующих методы исследования операций и теории графов, являются следующие:

- независимо от подхода, точные оптимальные решения имеют экспоненциальную сложность вычислений или коммуникаций относительно числа агентов [9, 18, 32, 36, 42, 45, 47]. Таким образом, в реальных задачах с достаточно большим числом агентов время вычислений становится основным препятствием их практического применения. Как показано в [58], при рассмотрении расходов на коммуникацию между агентами задача становится co-NP^{NP} -сложной³;

- использование эвристик для получения субоптимальных решений позволяет добиться полиномиальной сложности, однако это достигается наложением серьезных ограничений на возможные структуры коалиций;

- зачастую необходимо использование центрального агента для вычисления решения.

В случае централизованных подходов, как правило, теоретически возможно получить оптимальное решение, однако экспоненциальный характер сложности позволяет получить решение лишь для задач малой размерности, либо приходится вводить дополнительные ограничения. В случае распределенных алгоритмов получают приближенные решения, однако в общем случае эти алгоритмы обладают экспоненциальной сложностью коммуникаций, что также приводит к введению ограничений. Для перехода от гиперэкспоненциальной и экспоненциальной сложности к полиномиальной ограничиваются, как правило, следующие параметры: число агентов в одной коалиции, число коалиций и рациональность агентов, которая учитывает стоимость вычислительных ресурсов.

3.2. Формирование коалиций в условиях неопределенности

Традиционные модели формирования коалиций разработаны для детерминированной среды. Тем не менее в практических приложениях у агентов может быть неполное знание, например, о доходе коалиции, в которой они намереваются участвовать, или о степени их членства в различных коалициях. Агент может определить степень своего членства в потенциальных коалициях посредством индивидуальных обязательств перед другими агентами или сделок, которые указывают степень желаемого сотрудничества. Первый случай подразумевает формирование коалиций с нечеткими величинами выигрышей, тогда как второй случай связан с формированием нечетких коалиций, которые могут частично перекрываться [1].

Нечеткость является фундаментальным компонентом реалистичных моделей кооперации. Переговоры и торги обычно происходят перед использованием согласованных стратегий, когда агенты обладают неясным представлением об ожидаемой прибыли коалиций. Таким образом, распределение прибыли может быть нечетким, неопределенным и неоднозначным [39]. Тем не менее, применительно к многоагентным системам существует ограниченное число моделей, учитывающих неопределенность [15, 48].

Теория нечетких кооперативных игр позволяет ввести в модель неопределенность дохо-

³ В теории сложности, класс дополнений задач NP с оракулом для какой-нибудь задачи из NP.

дов и выгоды, получаемой от сотрудничества (участия в коалиции) [2]. Нечеткость возникает: (а) когда имеет место одновременное участие игроков в нескольких коалициях аналогичных играм с трансферабельной полезностью (ТУ-играм) и (б) когда существуют нечеткие ожидания прибыли игроков и коалиций. Примером подхода, ориентированного на второй случай является модель нечеткой кооперативной игры с С-ядром, разработанная в [6].

Существует и другой класс кооперативных игр в условиях неопределенности. Он является следствием кооперативного принятия решения в стохастической окружающей среде и охватывает «стохастические кооперативные игры» [11, 54]. Игра со стохастическими платежами определяется множеством агентов, множеством возможных действий, которые могут выполнять коалиции, и функцией, назначающей каждому действию коалиции вещественную стохастическую переменную с конечным ожиданием, представляющую выплату коалиции, соответствующую каждому специфическому действию. Хотя в работе [54] не рассматривается сам процесс формирования коалиций, вводится понятие С-ядра при неопределенности коалиционной ценности. В отличие от детерминированной кооперативной игры, выплаты могут быть случайными переменными, а действия, из которых может выбирать коалиция, должны быть смоделированы явным образом, так как выплаты не определены единственным способом.

3.3. Типы организации коалиционных систем

Постановка ЗФК в традиционной теории игр в экономике, сводится к моделям в которых коалиции, как правило, являются непересекающимися, другими словами, агенты, входящие в состав одной коалиции, не могут быть участниками других коалиций. Вместе с тем, как видно из постановки ЗФК, приведенной в разделе 2 и сделанной в предположении о наличии у агентов различных способностей, агенты могут входить в различные коалиции и тем самым участвовать в выполнении различных задач. Такая постановка задачи, в которой коалиции могут перекрываться становится в настоящее время все более актуальной.

В [45-47] авторы предлагают эвристические алгоритмы формирования частично перекрывающихся коалиций, которые позволяют находить квазиоптимальные решения по назначению задач в структуре непересекающихся

коалиций. Снижение сложности алгоритма достигается посредством ограничения размера коалиций. В рамках теории четких коалиционных игр постановка задачи формирования перекрывающихся коалиций рассмотрена в [12], в которой основное внимание уделяется вопросам стабильности перекрывающихся коалиций.

Другим важным свойством формирования коалиций является тип организации коалиционной системы, который в свою очередь непосредственно влияет на организацию процесса создания коалиций. В соответствии с постановкой ЗФК коалиционная система характеризуется задачами, которые она решает, и агентами, ее формирующими. В том случае, если эти параметры заданы и не меняются в процессе поиска оптимальных конфигураций коалиций, процесс формирования называется статическим, в противном случае - мы имеем дело с динамическим формированием коалиций. Следует подчеркнуть, что основная масса разработанных моделей относится к первому классу.

Подход к динамическому формированию коалиций первоначально сводился к построению стратегий передачи платежа между агентами, находящимися в рамках некой структуры коалиций. В результате вырабатывается некая оптимальная стратегия, в рамках которой формируется такая структура коалиций, при которой распределение платежей будет наилучшим с достаточной высокой вероятностью осуществимости. Кстати, в общем случае передача платежей возможна не только между агентами в рамках коалиции, но и любому другому агенту, который в эту коалицию не входит. Отметим, что это допущение не соответствует реальным приложениям.

В дальнейшем, динамическое формирование коалиций было предложено связывать с допустимостью прерывать процесс формирования коалиций. В статье [27] отмечается, что необходимость разработки многоагентных систем, способных функционировать в высоко динамичных, открытых и гетерогенных средах, ведет к необходимости перехода от традиционных кооперативных моделей к моделям динамического формирования коалиций (ДФК). Исследования в этой области включают разработку методов сотрудничества, схем и технологий, позволяющих решать задачи динамического создания выгодных коалиций среди агентов в открытых, распространенных и гетерогенных средах. Проблема ДФК наблюдается в любой

многоагентной среде, в которой множество задач, решаемых индивидуальными агентами, динамически меняется, т.е. агенты непрерывно получают новые цели от пользователей или других агентов; как следствие, для достижения этих целей они вынуждены входить или выходить из процесса формирования коалиций. Сценарии сотрудничества, вызывающие неопределенные, ограниченные временем, контекстно-ориентированные платежи и значения коалиции, являются частью проблемыДФК.

4. Модели формирования коалиций в теории игр

Теория игр рассматривает поведение заинтересованных агентов (игроков) в сложной системе для различных сценариев (игр). В зависимости от предположения о природе игры или о характере рационального поведения игроков теория игр различает кооперативные и некооперативные игры [4] (Рис. 3). Модели в теории некооперативных игр предполагают, что каждый игрок (например, фирма в сети поставок) оптимизирует свою собственную цель и не заботится об эффекте принимаемых решений для других. Взаимные соглашения среди игроков не разрешены. Основная задача состоит в нахождении оптимальных стратегий для каждого игрока, чтобы обеспечить ему в среднем наибольший возможный выигрыш.

Теория кооперативных игр (игр с ненулевой суммой) применима, когда могут быть достигнуты осуществимые соглашения, например, посредством контрактов, и может помочь смоделировать и понять основные отношения кооперирующихся партнеров в МАС. Теория кооперативных игр предполагает, что игроки могут заключать взаимные соглашения. Ключевые вопросы здесь - какая коалиция игроков сформируется, какое распределение общей ценности будет использоваться и устойчиво ли сотрудничество (существует ли такое распределение объединенной прибыли среди всех сторон в системе, чтобы никакая группа не могла добиться большего успеха самостоятельно).

В теории кооперативных игр разработаны модели формирования коалиций, которые можно разделить по двум признакам: по типу среды и по принципам дележа платежей [3, 5]. Среда может быть супераддитивной или субаддитив-

ной. В первом случае, при объединении любых двух непересекающихся коалиций новая коалиция получает, как минимум, платеж равный сумме платежей объединившихся коалиций. В такой игре у игроков есть интерес в создании большой коалиции и дележе полученного выигрыша. Во втором случае, объединение как минимум одной из потенциальных пар коалиций приводит к уменьшению ее выигрыша. Следует отметить, что большинство моделей построено для супераддитивных игр, тогда как реальные приложения, включая моделирование сетей поставок, требуют выполнения свойства субаддитивности.

В устойчивой системе в процессе кооперативной игры должно быть гарантировано такое распределение выгоды для каждого участвующего в коалиции агента, которое равняется как минимум вознаграждению, которое они получили бы без этого участия. Другими словами, при устойчивом распределении прибыли ни один из агентов не желает отделиться, поскольку не может добиться большего успеха, чем участвуя в коалиции.

Различают кооперативные игры с трансферабельной полезностью или побочными платежами, известные как TU-игры [3, 5], в которых платежи являются переводимыми, и игры без побочных платежей, где платежи непереводаемы. Для кооперативных игр с побочными платежами различные концепции решения отличаются предположениями о рациональном поведении игроков. По принципу построения «решения», кооперативные игры можно разделить на два класса: игры с множеством решений и с единичным решением [26]. К первому классу относятся подходы «стабильного множества»⁴ [57], С-ядра⁵ [22], К-ядра⁶ [16] и устойчивого множества⁷ [7]. Ко второму классу относятся подходы индекса Шепли [44], величины τ в TU-играх [55] и так называемого «ядрышка», который по аналогии с предыдущими подходами, связанными с понятием ядра, будем называть подходом N-ядра⁸ [43].

Индекс Шепли гарантирует агенту такую схему распределения платежей, при которой

⁴ В англоязычной литературе «the stable sets».

⁵ В англоязычной литературе «the core».

⁶ В англоязычной литературе «the kernel».

⁷ В англоязычной литературе «bargaining set».

⁸ В англоязычной литературе «the nucleolus».

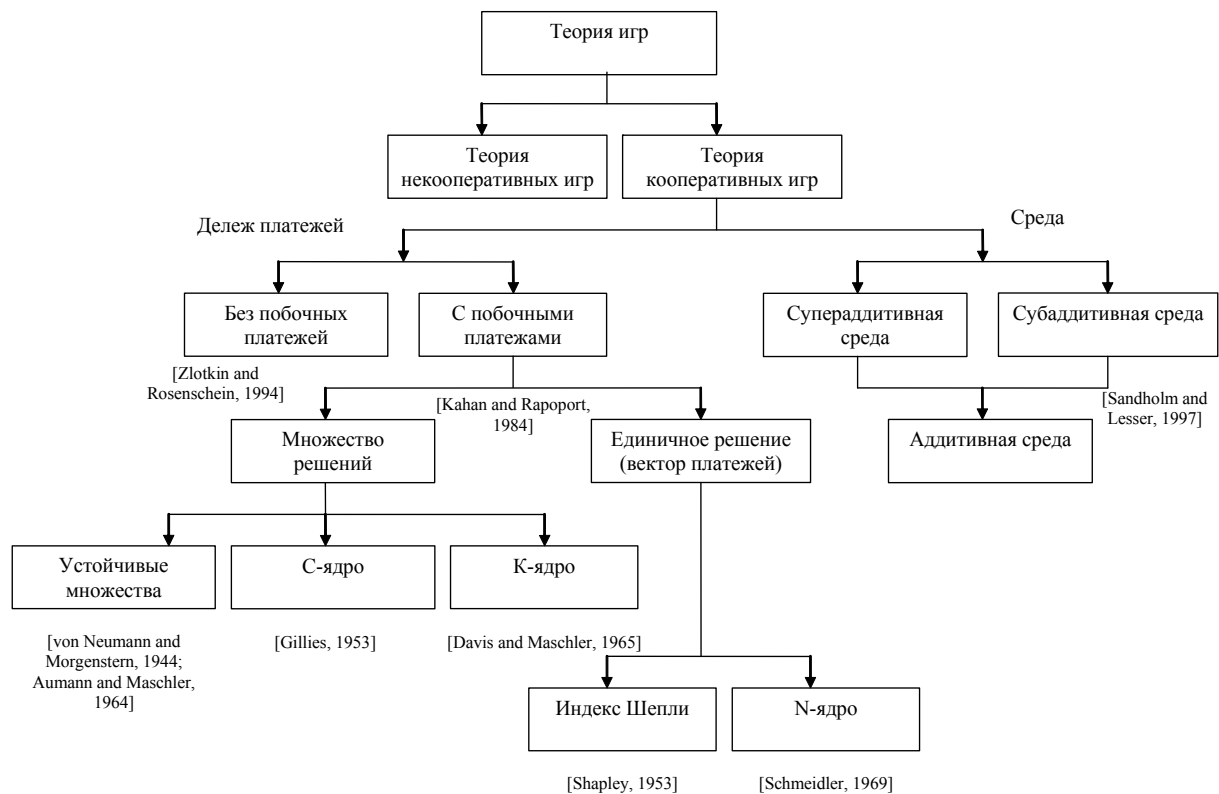


Рис. 3. Классификация методов теории кооперативных игр

он получает дополнительный усредненный на множестве возможных включений выигрыш, приносимый в коалицию. Хотя сложность вычисления индекса Шепли также носит экспоненциальный характер, были предложены различные коалиционные алгоритмы ее вычисления [28]. Однако условия эффективности и рациональности решений Шепли выполняется только для супераддитивных игр.

В [59] описан подход к формированию коалиций без побочных платежей, применимый к супераддитивным средам; таким образом, коалиционная структура сводится к наличию большой коалиции и агенту координатору, который распределяет задачи между игроками. Решение игры соответствует индексу Шепли, для чего необходимо знание всех задач и ресурсов агентов, а способности агентов должны быть симметричны. Данный подход был развит в работе [42], в которой авторы рассмотрели асимметричные возможности агентов применительно к проблеме маршрутизации транспортных средств в сети поставок.

К-ядро кооперативной игры - это набор К-устойчивых конфигураций, в котором все коалиции находятся в равновесии. Коалиция C на-

ходится в таком равновесии, если каждая пара агентов в C находится в равновесии; то есть, другими словами, если любая пара агентов в C уравновешена так, что ни один из них не может перевесить другого за счет возможности получения большей выгоды. Коалиции, находящиеся в равновесии, называются сбалансированными. С одной стороны, подход К-ядра является привлекательным, так как К-ядро уникально для любой игры с тремя агентами и означает равную выплату симметричным (сбалансированным) агентам некоторой коалиции в данной структуре коалиций. Каждая К-устойчивая конфигурация игры является Парето-оптимальной. С другой стороны, для получения решения каждый агент должен сравнить свой излишек с таковыми других агентов, это приводит к тому, что сложность вычисления ядра игры носит экспоненциальный характер, если не ограничивать размеры коалиции. Кроме того, в то время как два агента сравнивают свои перевесы, предполагается, что остальные агенты должны быть удовлетворены тем, что им положено получить. В работах [15, 29] были разработаны полиномиальные коалиционные алгоритмы для полиномиальных К-устойчивых

конфигураций коалиций с целью их применения информационными агентами, решающими задачи поиска в распределенных базах данных.

Под С-ядром понимают множество недоминируемых дележей кооперативной игры. С-ядро является замкнутым выпуклым подмножеством множества всех возможных дележей. Концепция С-ядра является привлекательной для построения коалиционных систем, т.к. максимизирует так называемую социальную выгоду (сумму полезностей коалиций в данной структуре). Такие решения называются С-устойчивыми. Для выпуклых игр концепция С-ядра связана с индексом Шепли, которая принадлежит ядру. Основная проблема игр с С-ядром заключается в вычислительной сложности поиска оптимальной структуры коалиций, так как для игры с I агентами необходимо проанализировать как минимум $2^{|I|-1}$ вариантов из общего числа $|I|^{I/2}$ структур коалиций. При этом сначала необходимо сгенерировать множество решений, а затем проверить их эффективность. Одна из первых работ, посвященных включению структуры коалиций в С-ядро, была опубликована Сандхольмом и Лессером [42]. Авторы не ограничиваются традиционной супераддитивной постановкой, однако ограничивают рассмотрение структурой непересекающихся коалиций. Вторая проблема кооперативных игр с С-ядром заключается в том, что для определенных классов игр ядро может оказаться пустым. По этим двум причинам, как отмечается в [27], игры с С-ядром до недавнего времени не получили практического использования.

Использование нечетких кооперативных игр с С-ядром в МАС исследовалось в работах [6, 36, 48]; в них авторы вводят расширенную модель ядра наряду с методом решения, основанном на использовании генетических алгоритмов, что позволяет успешно преодолеть указанные недостатки и использовать достоинства модели игры с С-ядром в практических приложениях [52]. Как показано в этих работах, предложенная модель применима к аддитивным средам, пересекающимся и непересекающимся коалициям. Для формирования С-ядра игры построена распределенная среда и разработан алгоритм переговоров между агентами, основанный на расширенном протоколе контактной сети.

Заключение

В статье рассмотрены основные подходы к построению многоагентных коалиционных систем, в которых алгоритмы формирования коалиций являются способом самоорганизации заинтересованных агентов с целью их адаптации к изменениям, как окружающей среды, так и самой системы. Формирование коалиций - это способ конфигурировать виртуальные организации агентов посредством применения согласованных стратегий, временная логика которых зависит от динамически меняющихся условий.

Когда речь идет об управлении сложными технико-экономическими или организационными системами, включающими в себя людей, принимающих решения, необходимо использование соответствующего их сложности аппарата моделирования открытых систем, обладающих способностью к самоорганизации и эволюции. До недавнего времени бытовало мнение, что соревнование предприятий – это игра с нулевой суммой, и до настоящего времени многие исследователи используют теорию некооперативных игр для анализа таких сложных систем как сети поставок (СП) [13, 37]. При этом одним из главных вопросов, рассматриваемых теорией некооперативных игр применительно к СП, является следующий: координирует ли сеть поставок, полученная в результате игры индивидуальная стратегия, то есть, максимизирует ли она полную объединенную прибыль участников сети.

За последнее время разработан целый ряд подходов к моделированию и управлению сложными технико-экономическими системами на основе кооперативных агентов, таких, например, как холоническое управление производственными системами, эволюционное управление сложными системами и децентрализованное интегрированное моделирование [1, 3, 19]. Эти модели применимы как к организациям с переменным набором сервисов (полностью открытые организации), так и с постоянным набором сервисов (частично открытые организации). Основное внимание в них уделяется исследованию кооперативных стратегий поведения, в которых центральное место занимают вопросы динамического конфигурирования интегрированных производственных систем как многоагентных коалиционных систем.

Постановка ЗФК с перекрывающимися коалициями, наряду с сетями поставок и виртуальными предприятиями, участвующими одновременно в различных коалициях, характерна для задач в электронной коммерции, вычислительных *Grid*-системах и сенсорных сетях. Для целого ряда приложений, например, конфигурирования открытых сетей поставок, когда агенты, представляющие предприятия, участвуют в формировании динамических временных коалиций с целью получения наибольшей выгоды, необходима дальнейшая разработка механизмов ДФК [27].

Динамическое конфигурирование систем – это новая область, которая включает в себе построение механизмов организации и самоорганизации, основываясь на процессах коалиционного взаимодействия агентов, адаптивных правилах целеполагания и принятия решений, для выработки которых агенты используют только локальную информацию.

Литература

- Витих В.А. Эволюционное управление сложными системами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2000. Т.2, №1, - С. 54-65.
- Жуковский В. И. Кооперативные игры при неопределенности и их приложения. // М.: Едиториал УРСС, 1999 - 336 с.
- Иванов Д. А. Разработка фундаментального междисциплинарного подхода к моделированию логистических и производственных сетей на основе DIMA // Логистика сегодня, 2008. №6, С. 346-353.
- Оуэн Г. Теория игр. // М.: Мир, 1971. – 232 с.
- Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семина Е.А. Теория игр. М.: Высшая школа, 1998.- 304с.
- Шереметов Л.Б. Модель нечетких коалиционных игр в задачах конфигурирования открытых сетей поставок // Известия РАН. Теория и системы управления. 2009. № 5. С. 94–108.
- Aumann R.J., Maschler, M. The bargaining set for cooperative games // Advances in Game Theory, eds. by M. Dresher, L.S. Shapley, A.W. Tucker. Series: Annals of Mathematics Studies, Princeton University Press, 1964. Vol. 52. - P. 443-476.
- Axelrod R. The Complexity of Cooperation: Agent Based Models of Competition and Collaboration // Princeton University Press, 1997.
- Butnariu D. and Klement E.P., Nor-Based Measures and Games with Fuzzy Coalitions. Kluwer, Dordrecht, 1993.
- Carabelea C., Boissier O. and Castelfranchi C. Using Social Power to Enable Agents to Reason about Being Part of a Group // 5th International Workshop on Engineering Societies in the Agents World, ESAW 2004. - P. 166-177.
- Chalkiadakis G., Markakis E., Boutilier C. Coalition Formation under Uncertainty: Bargaining Equilibria and the Bayesian Core Stability Concept // 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS'07, May 14–18, 2007, Honolulu, USA. – P. 400-407.
- Chalkiadakis G., Elkind E., Markakis E. and Jennings N. R. Overlapping Coalition Formation // Workshop on Internet and Network Economics, WINE, eds. by C. Papadimitriou and S. Zhang. LNCS 5385, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. - P. 307–321.
- Collins J., Arunachalam R., Sadeh N., Eriksson J., Finne N., Janson S. The Supply Chain Management Game for the 2007 Trading Agent Competition, CMU-ISRI-07-100. December 2006.
- Conte R., and Sichman J.S. DEPNET: How to benefit from social dependence // Journal of Mathematical Sociology, 1995. Vol. 20, no. 2-3. – P. 161-177.
- Contreras J., Klusch M. and Yen J. Multiagent Coalition Formation in Power Transmission Planning: a Bilateral Shapley Value Approach // Proc. 4th Int'l Conf. Artificial Intelligence Planning Systems. AAAI Press, Menlo Park, Calif., 1998. – P. 19–26.
- Davis M. and Machler M. The Kernel of a cooperative game // Naval Research Logistics Quarterly, 1965. Vol. 12. – P. 223-259.
- Durfee E. H., Lesser V. R. and D. D. Corkill. Trends in Cooperative Distributed Problem Solving // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1995. Vol. 1. – P. 63–83.
- Fisher R. and Ury W. Getting to yes Negotiation Agreement without Giving in. New York, Penguin Books, 1983.
- Fletcher M. Garcia-Herreros E. Christensen J.H. Deen S.M. Mittmann R. An open architecture for holonic cooperation and autonomy // Proceedings of the 11th International Workshop on Database and Expert Systems Applications, DEXA 2000. – P. 224 –230.
- Gasser L. Social Conceptions of Knowledge and Action: DAI Foundations and Open System Semantics // Artificial Intelligence 1991. Vol. 47, no. 1-3. – P. 107-138.
- Genesereth M., Ginsberg M. and Rosenchein J. Cooperation without Communication // Proc. Annual Conf. Assoc. Artificial Intelligence, Philadelphia, 1986. – P. 51-57.
- Gillies D.B. Some theorems on n-person games. Ph. D. thesis, Princeton University Press. Princeton. New Jersey, 1953.
- Hosam H. Khaldoun Z. Planning Coalition Formation under Uncertainty: Auction Approach // 2nd Information and Communication Technologies, ICTTA 2006. Vol. 2. – P. 3013-3017.
- Jennings N. R., Faratin P., Lomuscio A. R., Parsons S., Sierra C. and Wooldridge M. Automated negotiation: prospects, methods and challenges // International Journal of Group Decision and Negotiation, 2001. Vol. 10, no. 2. – P. 199-215.
- Jiang J.-G., Su Z.-P., Qi M.-B. and Zhang G.-F. Multi-task Coalition Parallel Formation Strategy Based on Reinforcement Learning // Acta Automatica Sinica, March 2008. Vol. 34, no. 3. – P. 349-352.
- Kahan J.P. and Rapoport A. Theories of Coalition Formation. Lawrence Erlbaum Associates, London, 1984.
- Klusch M. and Gerber A., A Dynamic Coalition Formation Scheme for Rational Agents // IEEE Intelligent Systems, May/June 2002. – P. 42-47.

28. Klusch M. and Shehory O. Coalition Formation among Rational Information Agents // *Proc. European Workshop on Modeling Autonomous Agents in a Multi-agent World (MAAMAW 96)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 1996. Vol. 1038. – P. 204–217.
29. Klusch M. and Shehory O. A Polynomial Kernel-Oriented Coalition Formation Algorithm for Rational Information Agents // *Proc. of the Int'l Conf. Multi-agent Systems*, AAAI Press, Menlo Park, Calif., 1996. – P. 157–164.
30. Kota R., Gibbins N. and Jennings N. R. Self-Organising Agent Organisations // *Proc. of the 8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, eds. by Decker, Sichman, Sierra and Castelfranchi, Budapest, Hungary, May 10–15, 2009. – P. 797–804.
31. Kraus S. Negotiation and Cooperation in Multi-agent Environments // *J. Artificial Intelligence*, 1997. Vol. 94, no. 1–2. – P. 79–98.
32. Kraus S., Shehory O., Taase G. Coalition formation with uncertain heterogeneous information // *Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, ACM, New York, 2003. – P. 1–8.
33. Lerman, K., Shehory, O. Coalition formation for large-scale electronic markets // *Proc. of the 4th Int. Conf. on MultiAgent Systems*, Boston, MA, USA 10 jul 2000 - 12 jul 2000. – P. 167 – 174.
34. Lin R., Kraus S., Wilkenfeld J. and Barry J. Negotiating with Bounded Rational Agents in Environments with Incomplete Information Using an Automated Agent // *Artificial Intelligence*, 2008. Vol. 172, no. 6-7. – P. 823–851.
35. Rao A. S. and Georgeff M. P. Modeling rational agents within a BDI-architecture // *Proc. of Knowledge Representation and Reasoning (KR&R-91)*, eds. by R. Fikes and E. Sandewall, Morgan Kaufmann Publishers: San Mateo, CA, April 1991. – P. 473–484.
36. Romero Cortés J., Sheremetov L. Model of Cooperation in Multi Agent Systems with Fuzzy Coalitions // *From Theory to Practice in Multi-Agent Systems*; eds. by B. Dunin-Kepicz, E. Nawarecki. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer Verlag, 2002. Vol. 2296. P. 263–272.
37. Rosenmuller J. The Theory of Games and Markets. North Holland, Amsterdam, 1982.
38. Rosenschein J. and Genesereth M. Deals among Rational Agents // *Proc. 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Los Angeles, August 1985. – P. 91–99.
39. Roth A. Game-theoretic models of bargaining. Cambridge, 1995.
40. Sandholm T. An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost Calculations // *Proc. Eleventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-93)*, Washington DC, 1993. – P. 256–262.
41. Sandholm T., Larson K., Andersson M., Shehory O., and Tohmé F. Coalition Structure Generation with Worst Case Guarantees // *Artificial Intelligence*, 1999. Vol. 111, no. 1–2. – P. 209–238.
42. Sandholm T.W. and Lesser V.R. Coalitions among Computationally Bounded Agents // *Artificial Intelligence*, 1997. Vol. 94. – P. 99–137.
43. Schmeidler D. The nucleolus of a characteristic function game // *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1969. Vol. 17. – P. 1163–1170.
44. Shapley L.S. A value for n-person games // *Contributions to the theory of games II*, Annals of Mathematics Studies, Vol. 28, eds. by H. W. Kuhn and A.W. Tucker. Princeton University Press. Princeton, 1953. – P. 307–317.
45. Shehory O. Optimality and Risk in Purchase at Multiple Auctions // *Proc. of 5th International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA 2001)*, eds. by M Klusch, F Zambonelli, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, 2001. Vol. 2182. – P. 142–153.
46. Shehory O., Kraus S. Formation of overlapping coalitions for precedence-ordered task-execution among autonomous agents // *Proc. of the 2nd Intern. Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS)*, 1996. – P. 330–337.
47. Shehory O. and Kraus S. Methods for task allocation via agent coalition formation // *Journal of Artificial Intelligence*, May 1998. Vol. 101, no. 1–2. – P. 165–200.
48. Sheremetov L.B., Romero Cortés J.C. Fuzzy Coalition Formation Among Rational Cooperative Agents // *Multi-Agent Systems and Applications III: CEEMAS 2003*; eds. by V. Marik, J. Muller, M. Pechoucek. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer Verlag, 2003. Vol. 2691. P. 268–280.
49. Shoham, Y. Leyton-Brown, K. Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations. New York: Cambridge University Press. 2009.
50. Sichman J., Conte R., Castelfranchi C. and Demazeau Y. A social reasoning mechanism based on dependence networks // *Proc. 11th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI)*, Amsterdam, Netherlands, 1994. – P. 188–192.
51. Sichman J. and Demazeau Y. A first attempt to use dependence situations as a decision criterion for choosing partners in multi-agent systems // *Proc. of ECAI Workshop on Decision Theory for DAI Applications*, 1994. Vol. 1, CD ROM.
52. Smirnov A.V., Sheremetov L.B., Chilov N., Romero Cortes J. Soft-computing Technologies for Configuration of Cooperative Supply Chain // *Applied Soft Computing*. Elsevier Science, 2004. Vol. 4, no. 1. P.87–107.
53. Smith R.G., and Davis R. Frameworks for Co-operation in Distributed Problem Solving // *IEEE Trans. on System. Man and Cybernetics*, 1981. Vol. 11, no. 1. – P. 61–70.
54. Suijs J., Borm P., Wagenaere A. D. and Tijs S. Cooperative games with stochastic payoffs // *European Journal of Operational Research*, 1999. Vol. 113. – P. 193–205.
55. Tijs S.H. Bounds for the core and the τ -value // *Game Theory and Mathematical Economics*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1981. – P. 123–132.
56. Vauvert G. and El Fallah-Segrouhni A. Coalition Formation among Strong Autonomous and Weak Rational Agents // *Proc. 10th European Workshop Modelling Autonomous Agents in a Multi-agent World (MAAMAW)*, 2001. CD-ROM.
57. Von Neumann J. and Morgenstern O. Theory of Games and Economic Behavior, Princeton University Press, 1944.
58. Wooldridge M. and Parsons S. Issues in the Design of Negotiation Protocols for Logic-Based Agent Communication Languages // *Agent-Mediated Electronic Commerce III*, eds. F. Dignum, U. Cortes. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Heidelberg, 2001. Vol. 2003. – P. 70–83.

59. Zlotkin G. and Rosenschein J.S. Coalition, Cryptography and Stability: Mechanism for Coalition Formation in Task

Oriented Domains // Proc. of the National Conference on AI, Seattle, WA, 1994. – P. 432-437.

Смирнов Александр Викторович. Заместитель директора по научной работе и заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН). Доктор технических наук, профессор. Автор 350 научных работ. Область научных интересов: интеллектуальное управление конфигурациями виртуальных и сетевых организаций, логистика знаний. E-mail: smir@iias.spb.su

Шереметов Леонид Борисович. Руководитель проектов Исследовательской программы по прикладной математике и вычислительной технике Мексиканского нефтяного института. Ассоциированный редактор журналов IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C и "Computación y Sistemas". Член технических комитетов «Компьютерная поддержка коллективной работы в проектировании» (IEEE Systems, Man and Cybernetics Society) и «Искусственный интеллект и экспертные системы» (IASTED). Доктор технических наук. Автор 250 научных работ. Область научных интересов: многоагентные системы, гибридные интеллектуальные системы, поиск данных и семантические сервис-ориентированные архитектуры. E-mail: sher@imp.mx