

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ИГРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рамках настоящей работы проведен сравнительный анализ существующих подходов к принятию решений в условиях неопределенности, разработана концептуальная модель принятия решений в условиях конфликтных ситуаций, а также предложена архитектура системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности на основе игрового моделирования.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, неопределенность, теория игр, некооперативные игры, статистические, кооперативные игры, стохастические игры.

Введение

Возросшие запросы производства и экономики, развитие информационных систем и технологий предъявляют все большие требования к процессу принятия решений и управления в различных областях человеческой деятельности. Особенно остро эта проблема стоит в условиях неполноты или низкого качества исходной информации. При решении таких оптимизационных задач успешно используется теория исследования операций и теория игр.

Аппарат теории игр активно применяется при создании систем поддержки принятия решений. При этом очень актуальна проблема разработки эффективных алгоритмов для поиска оптимальных стратегий в игровых моделях. На практике, с целью минимизации времени отклика и обеспечения интерактивности, требуется, чтобы алгоритмы были способны обрабатывать большое количество информации в режиме реального времени. Это может быть достигнуто путем их распараллеливания для различных архитектур современных вычислительных систем.

Особого внимания заслуживают задачи игрового моделирования в связи со сложностью формализации процесса принятия решений в условиях различных видов неопределенности. Поэтому необходима разработка концептуальной модели принятия решений в условиях конфликтных ситуаций, описывающей взаимодействие конкурирующих механизмов управления и воздействия, случайных факторов с учетом функций выигрышей игроков.

В связи с этим актуальна цель настоящего исследования – разработка концептуальной модели принятия решений в условиях конфликт-

ных ситуаций и ее реализация в рамках системы поддержки принятия решений.

Сравнительный анализ существующих подходов к принятию решений в условиях неопределенности

Существующие информационные системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности, как правило, используют неигровые алгоритмы [1, 2], например методы анализа иерархий, методы иерархических сетей, теорию нечеткости, теорию полезности, статистические методы и пр., что ограничивает возможность их применения задачами принятия решений только в условиях полной или стохастической неопределенности.

Однако в наши дни в различных социально-экономических сферах деятельности человека часто возникают задачи принятия решений в условиях конфликтов и конкурентной борьбы, когда несколько в общем случае рационально действующих субъектов осуществляют коллективное принятие решений, причем выигрыш каждого зависит не только от выбранной им стратегии, но и от решений других участников и результатов экспериментов. Подобные задачи можно встретить в экономике (например, конкуренция между продавцами схожей группы товаров), политике (конкуренция между политиками, политическими партиями, государствами), социологии (конкуренция за перераспределяемые блага в обществе) и в др. сферах.

Классические методы принятия решений в условиях неопределенности не способны эффективно учитывать существование конкуренции между несколькими ЛПР (лицами, принимающими решение). Теория игр [3–6], напротив, позво-

ляет формировать подходящие теоретико-игровые модели принятия решений, принимающие во внимание все виды неопределенности – стохастическую неопределенность, полную неопределенность, а также неопределенность поведения нескольких активных или пассивных игроков, выступающих в роли соперников или партнеров.

В рамках теории игр **существует несколько подходов к принятию решений в условиях конфликтных ситуаций** между несколькими игроками: **некооперативные игры** [3, 6], **статистические игры** [4], **кооперативные игры** [4, 5], **стохастические игры** [3].

Для сравнения игровых и неигровых подходов к решению задачи принятия решений в условиях неопределенности была составлена таблица 1.

Выбранные критерии, приведенные в первой колонке, отражают наиболее важные аспекты задачи принятия решений – неопределенность, наличие нескольких субъектов и возможность их кооперации.

Неигровые методы принятия решений способны справляться с задачами в условиях полной неопределенности: методы анализа иерархий – за счет парного сравнения альтернатив и критериев, методы нечеткого предпочтения – путем введений нечетких бинарных отношений, методы теории полезности – с помощью получения количественных оценок полезности возможных исходов. Однако данные методы, за исключением последнего, не могут быть непосредственно применены к задачам принятия решений в условиях стохастической неопределенности, а также неопределенности поведения других лиц. Они также учитывают возможность наличия нескольких лиц-экспертов, действующих совместно для принятия общего решения, но при этом подразумевается, что между ними нет эгоистических конфликтных интересов.

Теоретико-игровые подходы, напротив, специально разработаны для решения задач в условиях наличия нескольких игроков – ЛПР, действующих в соответствии с собственными эгоистическими интересами. Исключение составляет только узкий подкласс статистических игр, в котором единственный рациональный игрок противостоит множеству случайных дестабилизирующих факторов в роли других игроков.

Из игровых моделей только кооперативные игры учитывают возможность объединения игроков в коалиции с целью выработки совместных стратегий.

Все теоретико-игровые подходы принимают во внимание неопределенность поведения других участников. Кроме того, стохастические игры и статистические игры специально разработаны для задач со стохастической неопределенностью. Последний класс игр также может быть применен к решению задач в условиях полной неопределенности, в этом случае применяются различные критерии выбора чистых стратегий.

На основании вышеизложенного можно заключить, что методы теории игр лучше всего подходят к целям настоящего исследования. Для задач принятия решений в условиях полной неопределенности – игры с природой (подкласс статистических игр), в условиях стохастической неопределенности – статистические и стохастические игры, в случае отсутствия кооперации игроков – некооперативные игры, а при

Таблица 1. Сравнение основных подходов к решению задачи принятия решений в условиях неопределенности («+» – метод полностью соответствует критерию, «-» – не удовлетворяет критерию, «+/-» – частично подходит под критерий)

Критерии	Методы анализа иерархий	Методы нечеткого предпочтения	Методы теории полезности	Некооперативные игры	Статистические игры	Кооперативные игры	Стохастические игры
Решение задач с полной неопределенностью	+	+	+	-	+/-	-	-
Решение задач со стохастической неопределенностью	-	-	+	-	+	-	+
Решение задач с неопределенностью поведения других лиц	-	-	-	+	+	+	+
Учет наличия нескольких лиц (ЛПР или экспертов)	+	+	+	+	+	+	+
Учет наличия нескольких ЛПР с эгоистическими интересами	-	-	-	+	+/-	+	+
Учет возможности объединения эгоистичных ЛПР в коалиции	-	-	-	-	-	+	-

наличии возможности их объединения в коалиции – кооперативные игры. Также возможны смешанные варианты, например кооперативно-статистические игры, объединяющие условия двух данных классов игр.

Тем не менее в рамках настоящего исследования мы сосредоточимся в первую очередь на кооперативных играх, которые обеспечивают наиболее адекватные модели принятия решений в условиях современной экономики и конкурентных рынков [7], где имеют место тенденции к объединению или совместной координации действий игроков с целью получения большей прибыли – слияние и поглощение компаний, картельные сговоры, монополистические объединения и т. п.

Алгоритмы решения большинства игр имеют экспоненциальную временную сложность, например для кооперативных игр необходимо осуществлять комбинаторный перебор всех возможных коалиций, а также применять симплекс-метод для решения серии задач линейного программирования. Использование параллельных реализаций алгоритмов решения различных игр позволит, во-первых, увеличить размеры задачи (количество игроков, число их стратегий и т. д.), решаемой за то же время, и, во-вторых, значительно сократить время получения результатов, что обеспечивает большую интерактивность системе поддержки принятия решений при взаимодействии с пользователем, а также позволяет использовать решающий модуль в системах реального времени с критичным временем отклика, например в планировщике задач для грид-системы [8].

Поэтому в силу названных причин предлагаемая в данной работе система поддержки принятия решений в условиях неопределенности подразумевает распараллеливание решающих модулей для различных архитектур вычислительных систем – высокопроизводительных кластеров, грид-систем и многопроцессорных систем с общей памятью.

Отношения между различными классами игр

На рисунке 1 приведены основные классы игр, рассматриваемые в рамках настоящего исследования. Стрелками изображены отношения между ними: пунктирными – включение отдельных классов игр в качестве подклассов в другие

классы игр, непрерывными – возможная сводимость отдельных классов игр к другим классам в процессе решения. Например, стохастические игры сводятся к усеченным рекурсивным играм, которые, в свою очередь, решаются в виде серии матричных игр. Кооперативные игры могут использовать способ задания характеристической функции в виде набора матричных или биматричных игр между всевозможными парами коалиций игроков K против N/K [7], в этом случае для нахождения решения кооперативной игры сначала с целью построения характеристической функции $v(K)$ решается набор соответствующих матричных, биматричных, статистических и других игр, а затем находится вектор Шепли, С-ядро, N-ядро или НМ-решения.

Существует три основные возможности распараллеливания алгоритмов решения различных классов игр:

1. Параллельное решение серии (с учетом зависимостей) или набора независимых игр, к которым сводится данная игра. Например, параллельное решение набора независимых матричных или биматричных игр, к которым сводится кооперативная игра. Другой пример – параллельное решение серии матричных игр с учетом имеющихся зависимостей, к которой сводится рекурсивная игра.

2. Распараллеливание процесса сведения игры к другим играм. Например, параллельное построение матриц для матричных или биматричных игр, к которым сводится кооперативная игра.

3. Распараллеливание самого метода решения игры. Например, распараллеливание симплекс-метода позволит эффективно решать матричные, а также статистические игры с проведением эксперимента и без него для большого количества стратегий игроков. Другим примером является распараллеливание алгоритма нахождения вектора Шепли, являющегося частью алгоритма решения кооперативной игры.

Концептуальная модель принятия решений в условиях конфликтных ситуаций

Рассмотрим задачу принятия решения относительно управления некоторой системой Ω (см. рисунок 2). Воздействие на нее осуществляется набором устройств управления $\{P_i\}_{i=1,n}$ и случайными дестабилизирующими фактора-

ми $\{Y_j\}_{j=1, \dots, m}$. Каждое устройство управления P_i реализует управляющее воздействие $s_i \in S_i$, где S_i – множество его допустимых значений. Входные параметры s_i вместе формируют вектор $s = (s_1, \dots, s_n)$ управляющих воздействий. Аналогично вектор $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n)$ представляет собой случайные возмущения ($\varepsilon_j \in D_\varepsilon^j$), вызываемые дестабилизирующими факторами (неуправляемыми и косвенно-управляемыми) $\{Y_j\}$. Выходные сигналы системы описываются вектором $H(s, \varepsilon) = (H_1(s, \varepsilon), \dots, H_n(s, \varepsilon))$. $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_l)$ определяет воздействия игроков посредством системы на косвенно-управляемые факторы множества $\{Y_j\}$ (компоненты вектора σ_k – управляющие воздействия), а Γ – доступная устройствам управления информация о состоянии дестабилизирующих факторов $\{Y_j\}$.

Если управляющие механизмы $\{P_i\}$ функционируют как единое целое, подчиняясь общей цели максимизации выходных параметров, то в этом случае мы имеем **классическую многокритериальную оптимизационную задачу принятия решения**:

$$\begin{cases} H_i(s, \varepsilon) \rightarrow \max, & i = \overline{1, n}, \\ s \in S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n, \\ \varepsilon \in D_\varepsilon^1 \times D_\varepsilon^2 \times \dots \times D_\varepsilon^m. \end{cases} \quad (1)$$

Причем если дестабилизирующие факторы отсутствуют, то перед нами **обычная многокритериальная оптимизационная задача принятия решений в условиях определенности**:

$$H_i(s) \rightarrow \max, \quad i = \overline{1, n}, \quad s \in S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n, \quad (2)$$

в противном случае – **оптимизационная задача принятия решений в условиях стохастической или полной неопределенности**.

Если же управляющие механизмы функционируют в качестве независимых эгоистичных рациональных субъектов, причем каждый из них стремится максимизировать только свой выходной параметр (т. е. P_i добивается максимизации $H_i(s, \varepsilon)$, безотносительно к остальным значениям $H_j(s, \varepsilon)$, $j \neq i$), то в этом случае мы имеем **теоретико-игровую задачу принятия решений**.

В случае отсутствия дестабилизирующих факторов $\{Y_j\}$ задача сводится к классической **некооперативной игре** $G_{nc} = (\{P_i\}, \{S_i\}, \{H_i\})$, когда управляющим механизмам-игрокам запрещено договариваться относительно совместных стратегий, или к **кооперативной игре** $G_c = (\{P_i\}, v)$, когда им разрешено объединяться в коалиции с целью реализации совместных действий, причем характеристическая функция $v: 2^{\{P_i\}} \rightarrow R$, где $2^{\{P_i\}}$ – булеан (множество все-

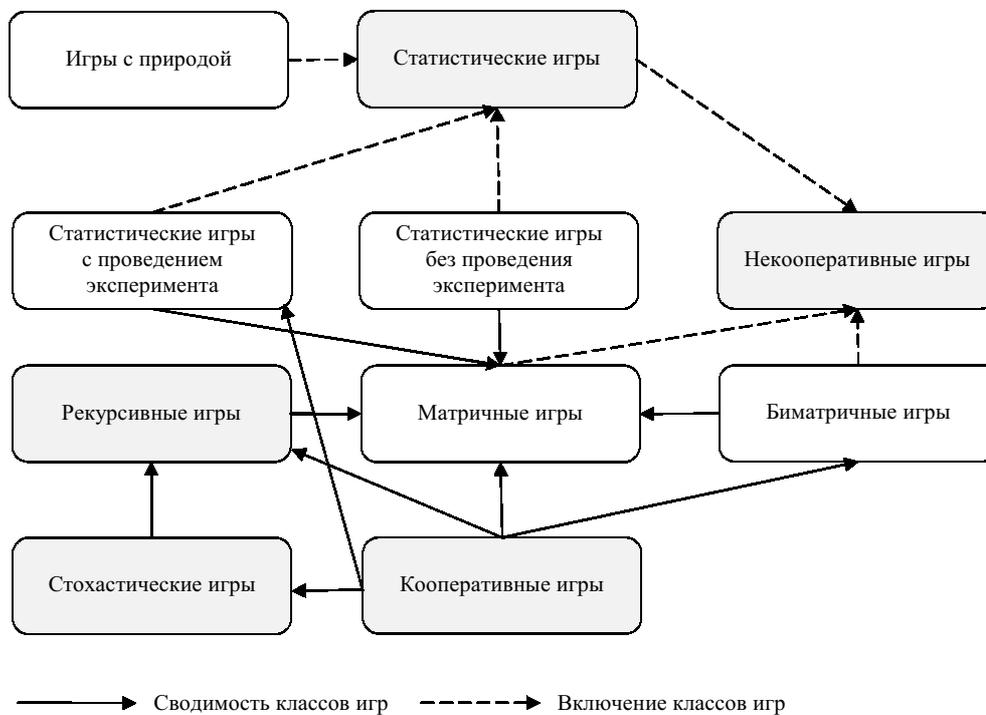


Рисунок 1. Отношения между различными классами игр

возможных коалиций игроков), строится на основе частных функций выигрыша $H_i(s)$ отдельных игроков. В обоих случаях моделируется принятие решений в условиях неопределенности поведения активного противника или партнера.

В ситуации, когда дестабилизирующие факторы $\{Y_j\}$ нельзя исключить, задача принятия решения сводится к **статистической игре** $G_s = (\{P_i\}, \{Y_j\}, \{S_i\}, \{D_\varepsilon^j\}, H(s, \varepsilon))$, если игроки не кооперируются, и к **составной кооперативно-статистической игре** $G_{cs} = (\{P_i\}, \{Y_j\}, \{S_i\}, \{D_\varepsilon^j\}, v)$ в противном случае. В этих играх к неопределенности поведения других игроков добавляется стохастическая неопределенность.

Стохастическая игра может быть описана в виде набора $G_{stoch} = (\{P_i\}, \{G_j\}, \{p(i, j, x^i)\})$, где $\{G_j\}$ – набор игровых элементов, представляющих собой кооперативные, некооперативные, статистические или смешанные варианты игр; $\{p(i, j, x^i)\}$ – вероятности перехода от игрового элемента G_i к элементу G_j при условии реализации ситуации x^i .

В рамках настоящей работы планируется реализовать и распараллелить для различных архитектур вычислительных систем алгоритмы решения всех перечисленных классов игр.

Архитектура системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности

Оптимальный вариант архитектуры разрабатываемой системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности приведен на рисунке 3.

Выделены следующие программные компоненты данной системы:

1. Решающие модули для конкретных архитектур параллельных вычислительных систем – грид-систем, кластеров и SMP-систем

(симметричных многопроцессорных систем с общей памятью). Каждый подобный модуль, представляющий собой параллельную программу, реализует алгоритм решения определенного класса игр и учитывает особенности соответствующей системы: для грид-систем – слабую связность между некоторыми парами исполняющихся многопоточных процессов в силу низкой пропускной способности части сетевых соединений; для кластеров – сильную связность в силу наличия высокопроизводительной сети, а также многопроцессорность вычислительных узлов (используется смешанная модель с многопоточными процессами); для SMP-систем – наличие общей памяти, обеспечивающей эффективный обмен информации между параллельными программными потоками процесса программы.

2. Модуль управления вычислениями, взаимодействуя с управляющими системами параллельной вычислительной техники, занимается запуском и контролем исполнения задач игрового моделирования принятия решений. Реализуется в виде отдельного программного сервиса.

3. Модуль взаимодействия с пользователем содержит удобный дружественный интерфейс работы с ЛПР, обеспечиваемый соответствующими подсистемами постановки задачи игрового моделирования принятия решений и визуализации полученных результатов. Реализуется в виде Web-приложения.

4. Модуль доставки данных при взаимодействии с сервисами сетевой передачи файлов вычислительной техники обеспечивает загрузку из хранилища данных входных файлов, необходимых решающим модулям, а также сохранение выходных файлов с результатами. Реализуется в виде отдельного программного сервиса.

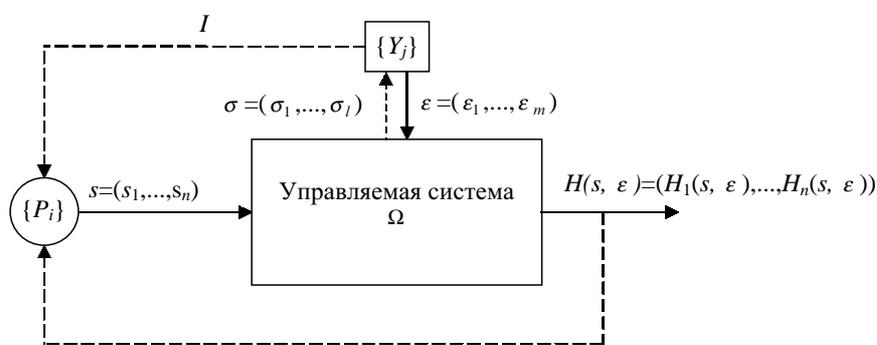


Рисунок 2. Общая модель принятия решений относительно управления системой Ω

5. Хранилище данных используется для хранения поставленных задач, параметров управления решающими модулями, текущей управляющей информации, полученных результатов, профилей пользователей системы. Реализуется в виде реляционной СУБД, поддерживающей структурированный язык запросов SQL.

6. Управляющие системы параллельной вычислительной техники обеспечивают все стадии локальной обработки вычислительных задач – их прием, постановку в очередь, планирование, запуск, контроль исполнения и сохранение результатов. Управляющие системы в общем случае представляют собой стандартные

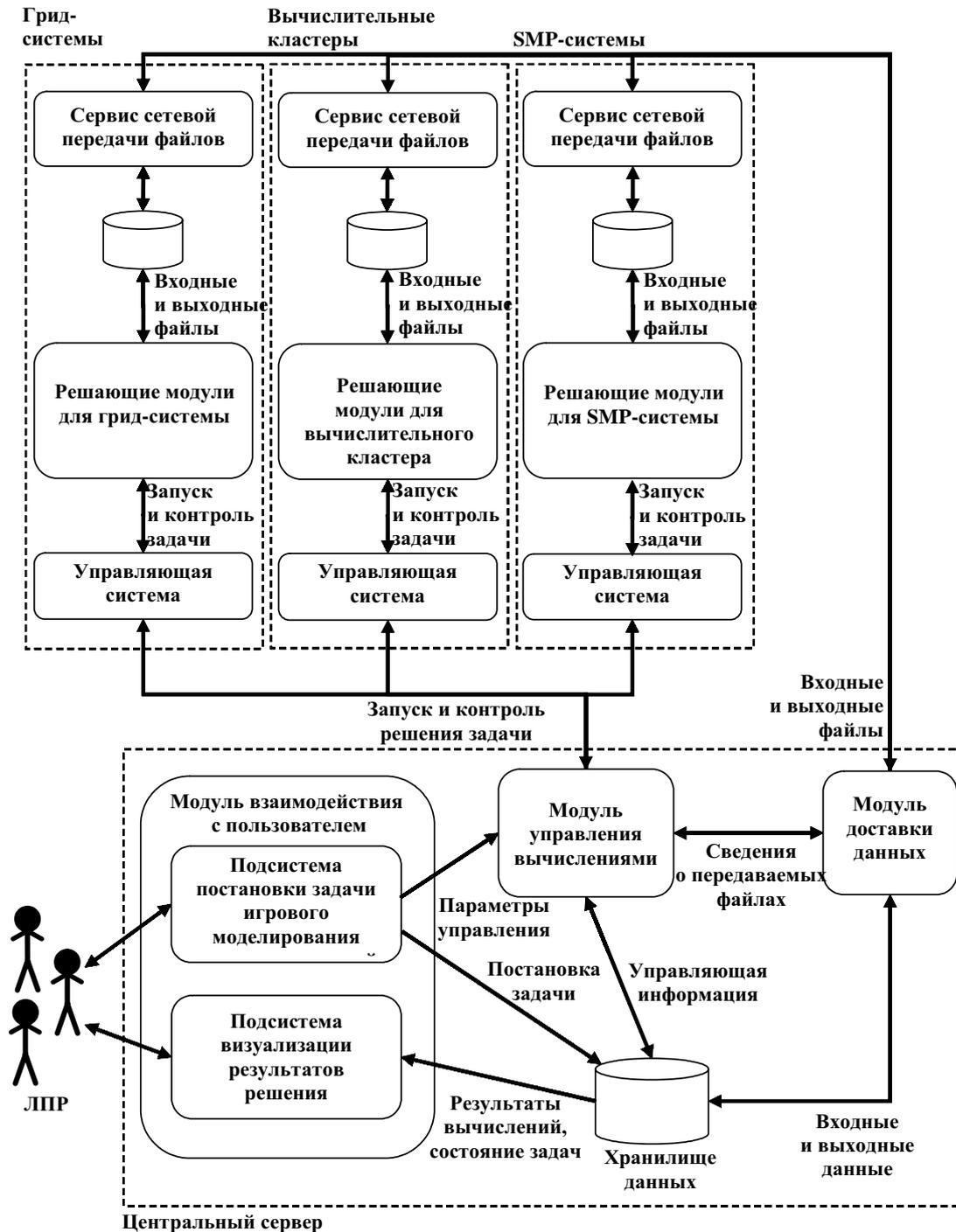


Рисунок 3. Архитектура системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности

автономные компоненты, способные параллельно выполнять задачи собственных пользователей вычислительной техники, которые не имеют отношения к данной системе поддержки принятия решений. Примеры подобных систем – Torque, Condor, LSF HPC.

7. Сервисы сетевой передачи файлов являются стандартными компонентами параллельной вычислительной техники и обеспечивают безопасную передачу файлов, необходимых для запускаемых задач, а также получение результатов вычислений. Пример подобного сервиса – демон с поддержкой протокола SFTP.

К числу аппаратных компонент настоящей системы поддержки принятия решений относятся: грид-системы, вычислительные кластеры и SMP-системы с предустановленными соответствующими версиями решающих модулей для различных классов игровых задач; центральный сервер, включающий все основные программные компоненты настоящей системы; компьютеры пользователей-ЛПР с установленными стандартными браузерами. Информационный обмен между данными аппаратными компонентами осуществляется через локальную сеть или сеть Интернет с использованием защищенных протоколов.

Данная декомпозиция архитектуры системы является оптимальной в том плане, что она:

- 1) учитывает основные классы параллельных вычислительных систем и особенности разработки для них параллельных программ;
- 2) позволяет при определении спецификаций общих интерфейсов взаимодействия модулей и подсистем вести их независимую разработку отдельными исполнителями;
- 3) обеспечивает возможность гибкой модификации архитектуры системы, например путем введения решающих модулей для других параллельных вычислительных систем;
- 4) дает возможность вести постепенную разработку системы, начиная с отдельных модулей;
- 5) обеспечивает большую управляемость и надежность всей системы.

Типичный пользовательский сценарий работы с данной системой:

1. Формирование решаемой задачи принятия решений в условиях неопределенности.
2. Выбор метода решения задачи.
3. Задание параметров работы решающего модуля (его тип, количество процессов/потоков, ограничения по времени исполнения и т. п.).
4. Запуск процесса решения задачи и ожидание окончания вычислений.
5. Просмотр и анализ полученных результатов.
6. Получение отчета с результатами.

Основные требования, предъявляемые к системе поддержки принятия решений в условиях неопределенности, – гибкость постановки задачи принятия решений, наглядность представления результатов, надежность функционирования, корректность, производительность и документированность.

Заключение

Выполнена сравнительная оценка методов принятия решений в условиях неопределенности, которая показала преимущество теоретико-игрового подхода, а также необходимость распараллеливания алгоритмов решения различных классов игровых задач. Использование параллельных реализаций алгоритмов позволяет увеличить размеры задач, решаемых за то же время, а также использовать решающий модуль в системах реального времени с критичным временем отклика, например в планировщике задач для грид-системы.

Разработана концептуальная модель принятия решений в условиях конфликтных ситуаций, описывающая взаимодействие конкурирующих механизмов управления и воздействия случайных факторов с учетом функций выигрышей игроков.

Предложена архитектура системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности с учетом наличия нескольких специальных решающих модулей для различных архитектур параллельной вычислительной техники.

24.02.2011

Список литературы:

1. Саати, Т.Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
2. Андрейчиков, А.В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 368 с.

3. Крушевский, А.В. Теория игр. – Киев: Вища Школа, 1977. – 216 с.
4. Губко, М.В. Теория игр в управлении организационными системами / М.В. Губко, Д.А. Новиков. – М., 2005. – 138 с.
5. Данилов, В.И. Лекции по теории игр. – М.: Российская экономическая школа, 2002. – 140 с.
6. Протасов, И.Д. Теория игр и исследование операций. – М.: Гелиос АРВ, 2006. – 368 с.
7. Нестеренко, М.Ю. Разработка программного обеспечения для моделирования конкурентного рынка на кластерных системах / М.Ю. Нестеренко, Д.В. Леонов, Е.В. Болгова, А.С. Кириллов // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, март–апрель, 2008, №54. – СПб.: ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО», 2008. – С. 156–161.
8. Carroll, T.E. Formation of Virtual Organizations in Grids: A Game-Theoretic Approach / T.E. Carroll, D. Grosu // Economic Models and Algorithms for Distributed Systems, Autonomic Systems, 2010, Part I. P. 63–81.

**Исследования выполнены при поддержке Министерства образования
и науки Российской Федерации в рамках реализации ФЦП
«Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»
на 2009–2013 гг. (государственный контракт №14.740.11.0287).**

Сведения об авторах:

Влацкая Ирина Валерьевна, заведующая кафедрой математического обеспечения информационных систем Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент
e-mail: mois@mail.osu.ru

Нестеренко Максим Юрьевич, преподаватель кафедры математического обеспечения информационных систем Оренбургского государственного университета,
кандидат технических наук, доцент, e-mail: nesteren@mail.osu.ru

Полежаев Петр Николаевич, аспирант кафедры математического обеспечения информационных систем математического факультета Оренбургского государственного университета
460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13, ауд. 2132, тел. (3532) 372534, e-mail: peter.polezhaev@mail.ru

UDC 519.83; 519.816

Vlatskaya I.V., Nesterenko M.Yu., Polezhayev P.N.

DEVELOPMENT OF SUPPORT SYSTEMS FOR DECISION-MAKING UNDER UNCERTAINTY BASED ON THE GAMING SIMULATION

In this work, we carried out a comparative analysis of existing approaches to decision making under uncertainty, developed a conceptual model of decision making in conflict situations, as well as proposed the support system for decision-making under uncertainty based on the gaming simulation.

Keywords: decision-making support system, uncertainty, game theory, non-cooperative games, statistics, cooperative games, stochastic games.

Bibliography:

1. Saaty, T.L. Decision-making at dependencies and feedbacks: Analytical networks. – М.: Publishing house LKI, 2008. – 360 p.
2. Andreychikov, A.V. Analysis, synthesis, planning of decisions in economy / A.V. Andreychikov, O.N. Andreychikova. – М: Finance and statistics, 2004. – 368 p.
3. Krushevsky, A.V. Game Theory. – Kiev: Vishya Shkola, 1977. – 216 p.
4. Gubko, M.V. Theory of games in management of organizational systems / M.V. Gubko, D.A. Novikov. – М: 2005. – 138 p.
5. Danilov, V.I. Lectures on Game Theory. – М.: Russian Economic School, 2002. – 140 p.
6. Protasov, I.D. Game theory and operations research. – М.: Helios ARV, 2006. – 368 p.
7. Nesterenko, M.U. The Development of Software for Competitive Market Simulation on Cluster Systems / M.U. Nesterenko, D.V. Leonov, H.V. Bolgova, A.S. Kirillov // Scientific and Technical Bulletin of Saint-Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics», march-april, 2008, №54. – SPb.: «SPbSU ITMO», 2008. – P. 156 – 161.
8. Carroll, T.E. Formation of Virtual Organizations in Grids: A Game-Theoretic Approach / T.E. Carroll, D. Grosu // Economic Models and Algorithms for Distributed Systems, Autonomic Systems, 2010, Part I. P. 63–81.