

**РАЗРАБОТКА САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ
ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ РЕШЕНИЕМ
ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ**

Богданова Вера Геннадьевна

К.т.н., доцент, с.н.с., e-mail: bvg@icc.ru

Пашинин Антон Алексеевич

М.н.с., e-mail: apcrol@gmail.com

Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова Сибирского
отделения Российской академии наук (ИДСТУ СО РАН), 664033
г. Иркутск ул. Лермонтова, 134,

Аннотация. Предлагается технология разработки интеллектуального мультиагентного решателя непроцедурных постановок вычислительных задач на распределенной модели предметной области. Используется агентный, ориентированный на прикладные микросервисы, способ организации вычислений на основе семантического взаимодействия прикладных агентов решателя. Приводится конечно-автоматная модель динамики функционирования агентов решателя. Предложенная технология демонстрируется на примере построения распределенного решателя для исследования поведения траекторий автономных двоичных динамических систем.

Ключевые слова: мультиагентная система, сервис, управление композицией сервисов, дискретно-событийная модель, обратная связь.

Цитирование: Богданова В.Г., Пашинин А.А. Разработка самоорганизующейся мультиагентной системы децентрализованного управления распределенным решением прикладных задач // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 3 (11). С. 115–126. DOI:10.25729/2413-0133-2018-3-13

Введение. Сложность многих практических задач, обладающих свойствами крупномасштабности, открытости, непредсказуемой динамики, мобильности компонент и т.п., обуславливает активизацию разработки программных средств для их решения на основе самоорганизации и мультиагентного подхода [15, 18]. Распределенность и децентрализованное управление указываются в работе [7, 14] в числе основных критериев качества и надежности таких программных систем. В этих же работах рассматриваются недостатки использования в управлении центрального узла, связанные с плохой масштабируемостью, недостаточной надежностью и с проблемами обеспечения конфиденциальности данных.

Распределенные вычисления на основе прямых взаимодействий агентов, в которых не предусматривается использование центрального управляющего узла, в последние годы являются предметом повышенного интереса многих исследователей в области вычислительных технологий. В работе [8] для децентрализованного подхода обсуждаются перспективы различных способов взаимодействий агентов. В качестве преимущества прямых взаимодействий указывается обеспечение проектирования заданных форм

самоорганизации поведения с требуемыми показателями надежности. В работе [17] отмечается хорошая адаптируемость прямых взаимодействий к динамическим средам, и более высокая реактивность к внешним изменениям по сравнению с косвенными взаимодействиями.

Ориентируясь на динамичность гетерогенной распределенной вычислительной среды, при разработке распределенного решателя мы объединяем преимущества мультиагентной и сервис-ориентированной технологий, децентрализованного управления с прямым взаимодействием агентов (в отличие от [16]) и используем самоорганизацию при формировании в сервис-ориентированных пакетах прикладных программ (СППП) композиции агентов-сервисов для непроцедурной постановки задачи на распределенной вычислительной модели предметной области без ее языкового описания (в отличие от [6]). Поведенческая модель агентов распределенного решателя реализована на основе дискретно-событийной конечно-автоматной модели.

В статье описан новый подход к интеллектуализации децентрализованного коллективного управления процессом решения задач в распределенной вычислительной среде на основе прямых взаимодействий агентов. Используется агентный, ориентированный на прикладные микросервисы, способ организации вычислений в распределенном решателе на основе семантического взаимодействия прикладных агентов решателя, активная группа которых при непроцедурной постановке задачи [11] формируется в процессе сборочного программирования путем распределенного логического вывода на вычислительной модели предметной области [2].

1. Средства информационной поддержки взаимодействия агентов. Основными средствами информационной поддержки такого семантического взаимодействия агентов распределенного решателя являются база знаний и вычислительное поле. В качестве базы знаний выступает вычислительная модель предметной области, подробно описанная в [9]. Вычислительная модель представляется в виде совокупности параметров предметной области и функциональных отношений между ними. Каждое функциональное отношение реализуется программным модулем, который вычисляет значения выходных параметров по заданным значениям входных параметров. Вычислительное поле (ВП) представляет собой совокупность объединенных сетью логических вычислительных узлов, на которые устанавливаются агенты распределенного решателя. Функциональные возможности каждого агента определяются требованиями включения связанного с агентом модуля в вычислительный процесс решения прикладной задачи. Под логическим узлом понимается физический вычислительный ресурс, в качестве которого могут выступать: множества ядер процессора и узлов вычислительного кластера, персональный компьютер, виртуальная машина, мобильное устройство. ВП является дискретным, числовое значение поля в каждом узле вычисляется агентом в зависимости от его состояния и в соответствии с правилом распространения поля по сети. Нулевое значение поля является триггером включения соответствующего модуля в процесс решения прикладной задачи.

2. Разработка распределенного решателя. Для реализации предложенного подхода используются инструментальные средства HPCSOMAS 3.0, которые по сравнению с предыдущими версиями [1, 5, 10] имеют следующие дополнительные возможности:

- состав библиотеки классов для создания агентов дополнен новым классом описания динамики функционирования агента на основе дискретно-событийной конечно-автоматной модели;
- при непроцедурной постановке задачи на распределенной вычислительной модели предметной области формирование композиции сервисов выполняется в процессе распределенного сборочного программирования [2] без явного указания порядка их выполнения;
- событийное управление этой композицией осуществляется самоорганизующейся мультиагентной системой, в которую входят агенты, созданные на основе нового класса;
- эти агенты управляют запуском реактивного вычислительного агента, представляющего программный модуль;
- для взаимодействия с пользователем разработан новый агент, предоставляющий интерфейс для непроцедурной постановки задачи с использованием словаря параметров предметной области.

Таким образом, в состав распределенного решателя (СППП), разработанного на основе HPCSOMAS 3.0, входят агенты следующих типов (рис. 1):

- агент постановки задачи *PSA* (problem statement agent);
- агент распределенного решателя *DSA* (distributed solver agent);
- вычислительный агент *CMA* (computational module agent).

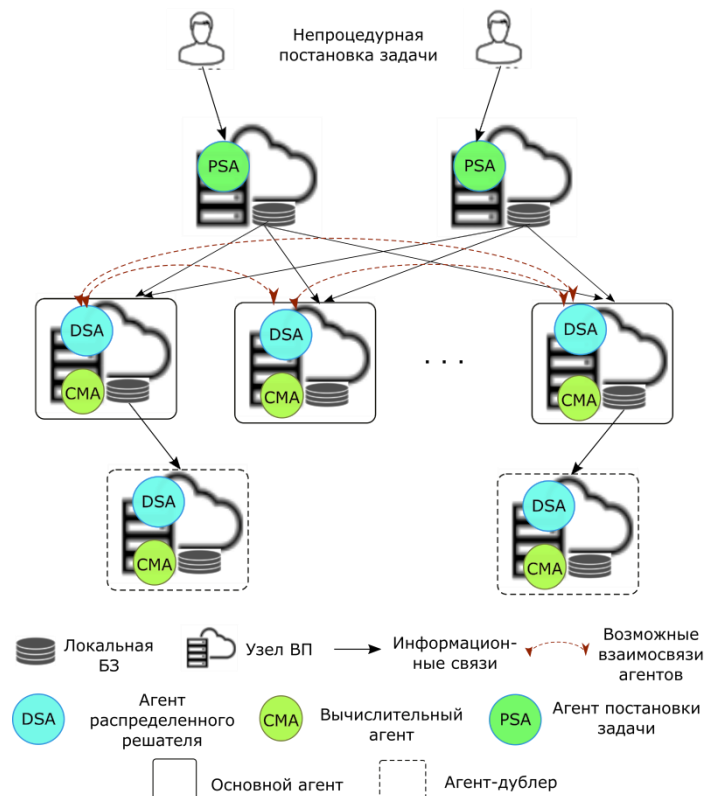


Рис. 1. Архитектура СППП.

Пунктирные стрелки на рис. 1 показывают возможные взаимодействия агентов *DSA*, которые конкретизируются в процессе инициализации при чтении локальной базы знаний, содержащей сведения об агентах-предшественниках и агентах-последователях.

2.1. Агент PSA. Агент PSA поддерживает работу со следующими объектами:

- словарь параметров предметной области;

- сервисы, реализующие функциональные возможности прикладных предметных модулей СППП;
- логические узлы ВП, ассоциированные с конкретным вычислительным ресурсом;
- список агентов СППП.

Права доступа к этим объектам агента PSA имеют только администратор и разработчик СППП. Скриншот интерфейса агента PSA изображен на рис. 2.

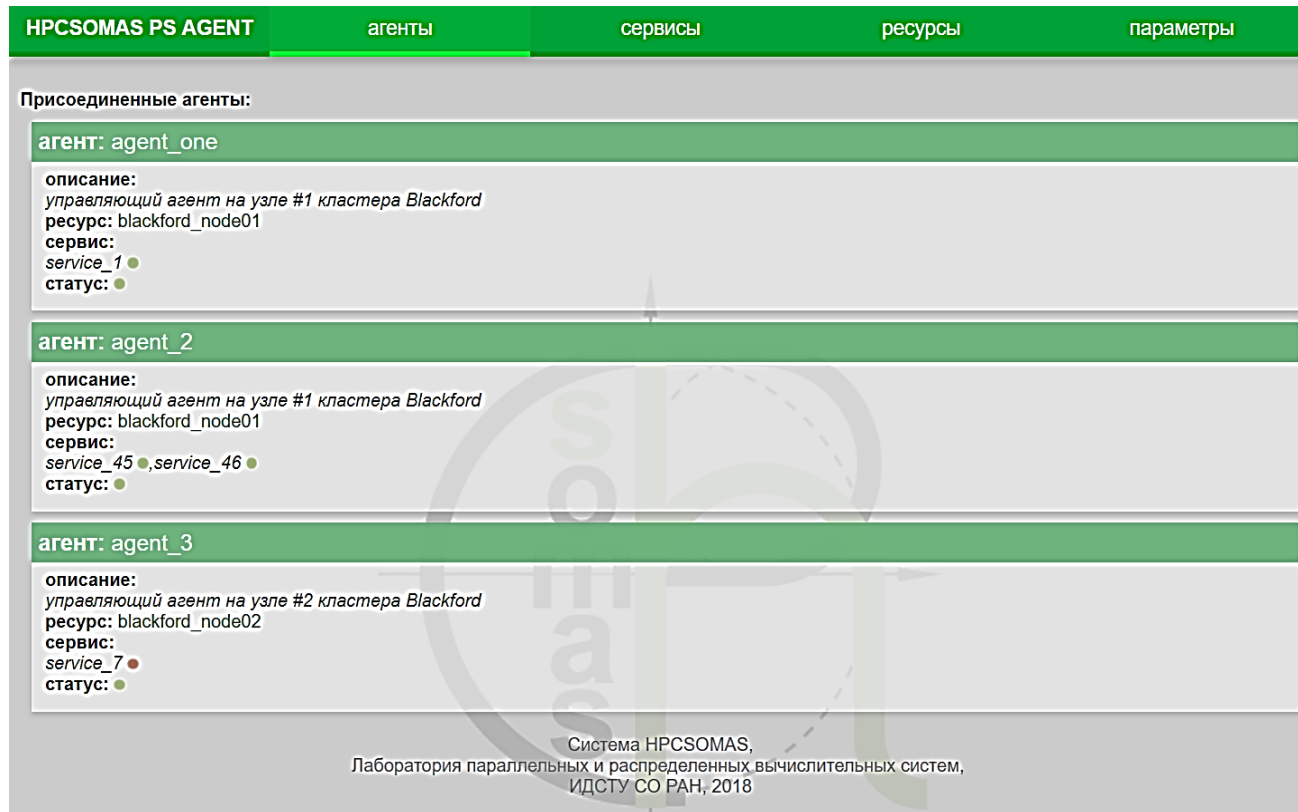


Рис. 2. Интерфейс агента PSA.

2.2. Агент DSA. Группой агентов DSA осуществляется децентрализованное управление решением задачи в СППП на основе прямых взаимодействий. Единственным методом координации поведения агентов, как при формировании группы, так и при выполнении совместных действий, является способ управления поведением агентов «по готовности входных данных» (событийное управление). Поведение агента описано дискретно-событийной конечно-автоматной моделью FSMvVW (Finite State Machine with Variables and Works), разработанной авторами [9]. В состав агента входят дешифратор сообщений, обработчик сообщений, система таймеров. Сообщения хранятся в очереди и обрабатываются в порядке поступления. Знания агента DSA хранятся в локальной базе знаний, в качестве которой выступает модель предметной области, распределенная так, что каждый агент обладает ограниченными знаниями, как о возможностях других агентов системы, так и о топологии вычислительного поля в целом. Тип агент DSA имеет следующие основные модификаторы:

- обычный/управляющий (ordinary/control);
- последовательный/параллельный (consecutive/parallel).

Модификатор управления используется для агентов DSA с предикатом, проверка истинности которого выполняется перед запуском агента CMA. Параллельный агент DSA

устанавливается на логические узлы ВП, которым соответствует многопроцессорный вычислительный ресурс. Агенты СМА представляют вычислительные модули предметной области и реализуются в виде микросервисов.

3. Технология разработки решателя. Предполагается, что у разработчиков есть ППП, в состав которого входят база знаний и библиотека предметных модулей, составляющих функциональное наполнение пакета. Построение распределенного решателя осуществляется с помощью следующих этапов:

- программным способом или с помощью средств автоматизации ABCSW [5, 10] прикладные модули ППП реализуются в виде агентов-микросервисов СМА;
- создаются агенты DSA (программным способом с использованием HPC SOMAS API или автоматически с помощью ABCSW);
- создается и заполняется локальная база знаний (БЗ) агентов DSA.

Агенты DSA могут быть подготовлены разными разработчиками, предоставляющими для их использования только интерфейс прикладного модуля (вход и выход). Наш подход предполагает использование общего формата параметров, имена которых уникальны, а спецификации параметров описаны в словаре предметной области.

3.1. Этапы организации решения задачи. Процесс решения задачи осуществляется с помощью следующих шагов:

1. Формирование активной группы агентов (метод распределенной прямой волны [2]). На этом шаге в сообщениях передаются только признаки вычислимости (имена параметров). Агенты обмениваются сообщениями с соседями, информация о которых содержится в локальной базе знаний (используется только прямое взаимодействие).
2. Редуцирование множества входных параметров задачи в случае его избыточности (распределенная обратная волна [2]).
3. Совместные действия агентов. Этот этап выполняется аналогично первому, только в сообщениях передаются значения параметров.

3.2. Постановка задачи пользователем. Конечному пользователю предоставляется интерфейс для формирования запроса на решение задачи. Для непроцедурной постановки задачи используется вкладка «Решатели». Пользователь выбирает нужный решатель, в результате появляется список параметров предметной области, где галочками должны быть помечены требуемые параметры в колонках «Вход» и «Выход». После первого шага решения задачи могут возникнуть две ситуации. В первом случае сформируется активная группа агентов (которые обеспечат нахождение значений выходных данных по заданным значениям входных данных на третьем этапе решения задачи), и пользователю откроется форма для ввода значений параметров. Во втором случае пользователю выдастся сообщение, что задача не может быть решена.

4. Пример разработки распределенного решателя. Рассмотрим технологию разработки на примере создания решателя для важной с практической точки зрения и трудной в вычислительном плане задачи поиска равновесных состояний и циклов заданной длины k в двоичной динамической системе (ДДС), векторно-матричное уравнение которой имеет вид:

$$x^t = F(x^{t-1}), \quad (1)$$

где x – вектор состояния, $x \in B^l$, $B = \{0,1\}$, l – размерность вектора состояния; $t \in T = \{1,2,\dots,k\}$ – дискретное время (номер такта); $F(x)$ – векторная функция алгебры логики, называемая функцией переходов, $x \in B^l$. Система булевых уравнений (1) для $T = \{1,2,\dots,k\}$ эквивалентна одному булеву уравнению вида

$$\Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k) = \bigvee_{t=1}^k \bigvee_{i=1}^n (x_i^t \oplus F_i(x^{t-1})) = 0.$$

Для каждого состояния $x^0 \in B^l$ определим траекторию $x(t, x^0)$ системы (1) как конечную последовательность состояний x^0, x^1, \dots, x^k из множества B^l . Траектория x^0, x^1, \dots, x^k называется циклом длины k , если x^0, x^1, \dots, x^{k-1} попарно различны и $x^k = x^0$. Условие отличия двух состояний записывается как

$$R_k(x^0, x^1, \dots, x^{k-1}) = \bigvee_{0 \leq p < q \leq k-1} \bigwedge_{i=1}^r y_i^{pq} = 0, \quad y_i^{pq} = (x_i^p \cdot x_i^q \vee \overline{x_i^p \cdot x_i^q}).$$

Новый логический метод решения этой задачи полностью описан в работе [2, 9]. Кратко приведем суть метода, состоящую в том, что исходная задача (1) сводится с помощью ряда преобразований к задачам нахождения решений следующих булевых уравнений соответственно для поиска равновесных состояний и циклов длины k):

$$\Phi_1(x^0, x^1) \Big|_{x^1=x^0} = 0,$$

$$\Phi_k(x^0, x^1, \dots, x^k) \Big|_{x^k=x^0} \vee R_k(x^0, x^1, \dots, x^{k-1}) = 0.$$

Пусть исходная булева функция (1) будет задаваться в формате «.cnet» [13]. Тогда для решения задачи понадобятся программные модули, выполняющие следующие функции:

- преобразование описания булевой функции (1) из формата “.cnet” к функции Φ_1 ;
- формирование булевых моделей Φ_1, Φ_2, \dots соответственно для $k=1, 2, \dots$ и вызов авторского решателя этих уравнений [4].

Применим предложенный подход для решения конкретной задачи, возникающей при исследовании контроля морфогенеза растений. В качестве примера рассмотрим описание геной регуляторной сети (ГРС) цветка *Arabidopsis thaliana* [12]. Пусть k не превышает значение 5. Словарь параметров для этого случая приведен в таблице 1. На рис. 3 (а) приведено описание ГРС (из [12]), соответствующий формат «.cnet» можно найти на сайте [«https://people.kth.se/~dubrova/»](https://people.kth.se/~dubrova/). Нужно перейти от этого формата к описанию динамики ГРС булевыми уравнениями, представленными на рис. 3(б).

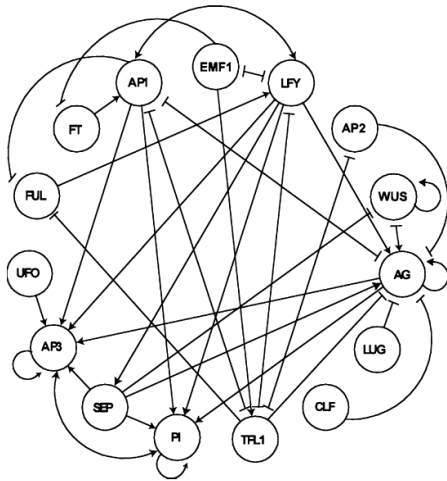
Таблица 1. Словарь параметров СППП.

| № | Имя параметра | Описание |
|---|---------------|-------------------------------|
| 1 | F | Функция (1) в формате “.cnet” |
| 2 | PC | Массив равновесных состояний |
| 3 | Ц2 | Массив циклов длины 2 |
| 4 | Ц3 | Массив циклов длины 3 |
| 5 | Ц4 | Массив циклов длины 4 |
| 6 | Ц5 | Массив циклов длины 5 |
| 7 | Ф1 | Функция Φ_1 |

Соответствующие модули (табл. 2) формируют булевы модели (БМ) по этим уравнениям и выполняют поиск равновесных состояний и циклов длины k , запуская решатель булевых уравнений на этих моделях.

Таблица 2. Список модулей СПШ

| № | Имя модуля | Описание |
|---|------------|---|
| 1 | M1 | Начальный модуль, отправляет в семантическую сеть агентов входные параметры |
| 2 | M8 | Конечный модуль, объединяет выходные параметры |
| 3 | MP1 | Формирование БМ для $k=1$, запуск SAT решателя |
| 4 | MP2 | Формирование БМ для $k=2$, запуск SAT решателя |
| 5 | MP3 | Формирование БМ для $k=3$, запуск SAT решателя |
| 6 | MP4 | Формирование БМ для $k=4$, запуск SAT решателя |
| 7 | MP5 | Формирование БМ для $k=5$, запуск SAT решателя |
| 8 | МФ1 | Формирование Φ_1 |



$$\begin{aligned}
 x_1^t &= x_{10}^{t-1} \cdot x_{14}^{t-1} \cdot x_{15}^{t-1} \cdot x_1^{t-1} \vee x_5^{t-1} \cdot x_{14}^{t-1} \cdot x_{15}^{t-1} \cdot x_1^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_2^{t-1} \\
 x_2^t &= x_2^{t-1} \\
 x_3^t &= x_5^{t-1} \cdot x_{13}^{t-1} \\
 x_4^t &= x_6^{t-1} \\
 x_5^t &= x_{10}^{t-1} \cdot x_{13}^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_{10}^{t-1} \vee x_4^{t-1} \cdot x_{10}^{t-1} \\
 x_6^t &= x_7^{t-1} \\
 x_7^t &= x_{13}^{t-1} \vee x_6^{t-1} \\
 x_8^t &= x_{13}^{t-1} \\
 x_9^t &= x_9^{t-1} \cdot x_{15}^{t-1} \vee x_9^{t-1} \cdot x_{10}^{t-1} \\
 x_{10}^t &= x_7^{t-1} \cdot x_{10}^{t-1} \cdot x_{15}^{t-1} \vee x_8^{t-1} \cdot x_{13}^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_{12}^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_{11}^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_9^{t-1} \vee x_5^{t-1} \cdot x_7^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_8^{t-1} \\
 x_{11}^t &= 1 \\
 x_{12}^t &= 1 \\
 x_{13}^t &= x_5^{t-1} \cdot x_6^{t-1} \cdot x_7^{t-1} \\
 x_{14}^t &= x_5^{t-1} \cdot x_{14}^{t-1} \cdot x_{15}^{t-1} \cdot x_1^{t-1} \vee x_{10}^{t-1} \cdot x_{14}^{t-1} \cdot x_{15}^{t-1} \cdot x_1^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_{10}^{t-1} \vee x_7^{t-1} \cdot x_1^{t-1} \\
 x_{15}^t &= x_7^{t-1}
 \end{aligned}$$

(а)

(б)

Рис. 3. ГРС (а), описание динамики ГРС (б).

В соответствии с технологией, описанной в п. 3, все модули из табл. 2 должны быть представлены в виде микросервисов. Затем нужно создать управляющих агентов DSA – множество $Ag = \{Ag_1, \dots, Ag_8\}$. Обозначим непроцедурную постановку задачи как $T = (A_0, B_0)$, где A_0 – множество значений входных параметров, по которым нужно найти значения множества выходных параметров B_0 . В нашем случае непроцедурная постановка задачи будет иметь вид: $T = (\{F\}, \{PC, Ц\})$ (рис. 4).

На рис. 5 приведена семантическая сеть агентов решателя. Стрелками выделены взаимосвязи агентов с предшественниками и последователями по входу (In) и по выходу (Out) в соответствии с информацией в локальных БЗ. Сплошными стрелками выделены взаимосвязи в активной группе агентов $Ag^* = \{A2, A1, A8, A3, A5\}$, сформированной на основе самоорганизации в процессе распределенного сборочного программирования. Агенты A1 и A5 независимы друг от друга и могут выполняться параллельно в асинхронном режиме. В результате решения задачи найдены 10 равновесных состояний. Циклов длины 3 не найдено.

Эксперименты проводились с использованием вычислительных ресурсов [3].

Заключение. Приведено описание новой версии инструментальных средств HPCSOMAS 3.0. Разработана, продемонстрирована и протестирована новая технология интеллектуализации децентрализованного коллективного управления процессом решения задач в распределенной вычислительной среде на основе прямых взаимодействий агентов с использованием этих средств.

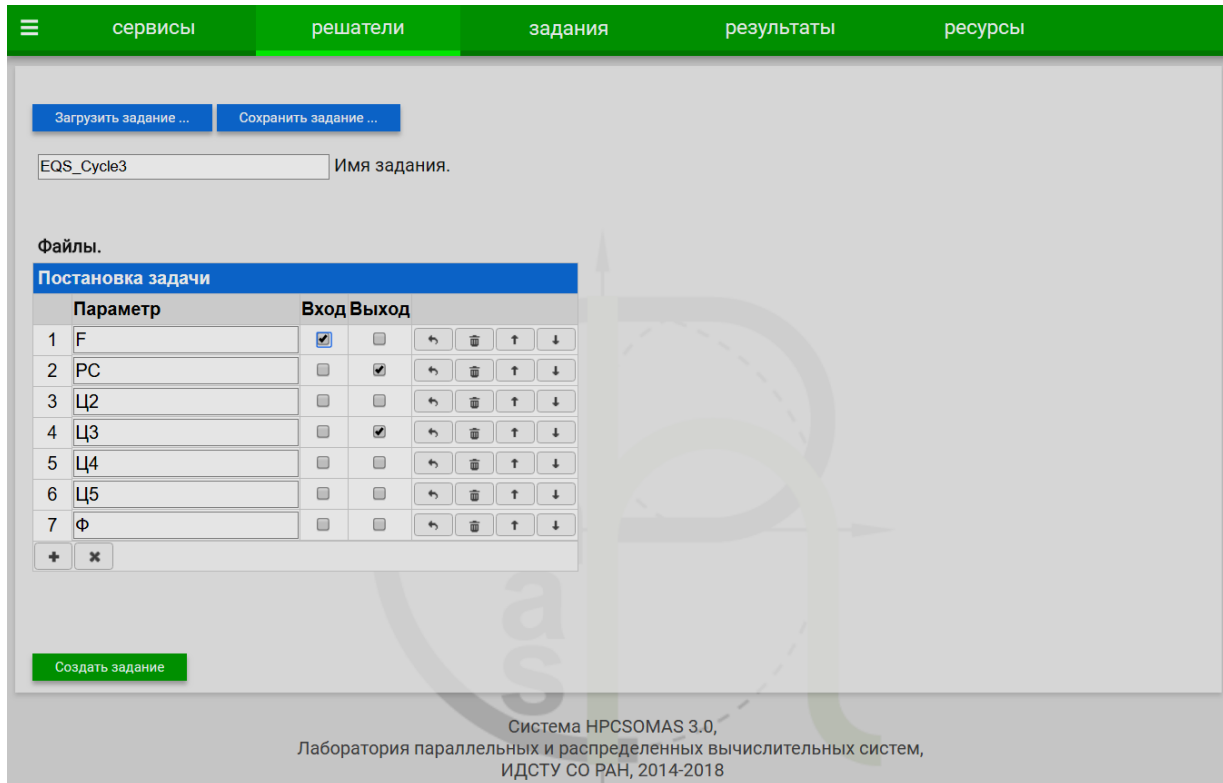


Рис. 4. Интерфейс непроцедурной постановки задачи $T = (\{F\}, \{PC, Ц3\})$.

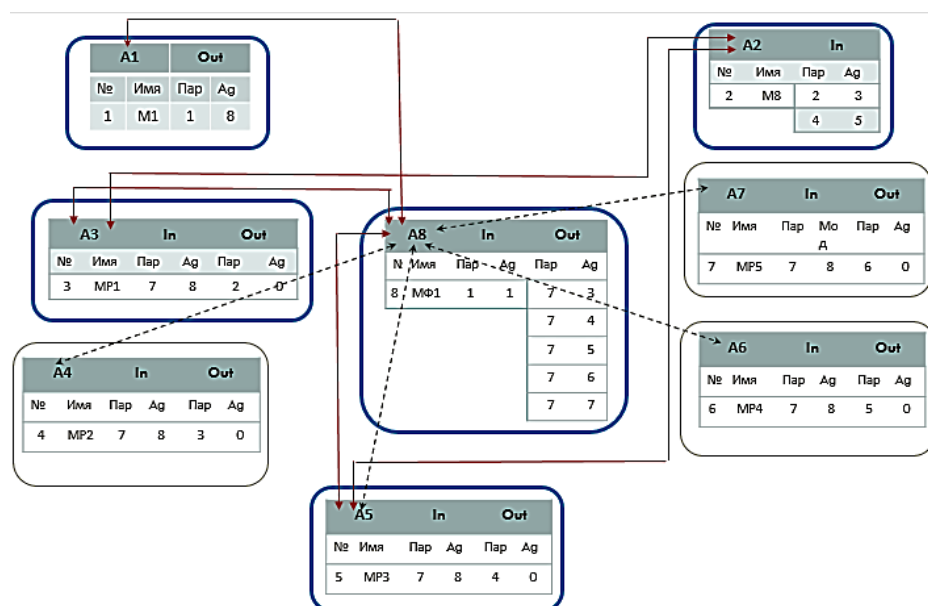


Рис. 5. Сеть агентов распределенного решателя на узлах ВП.

Работа подготовлена при поддержке РФФИ, проект № 18-07-00596/18, и программы президиума РАН №30 "Теория и технологии многоуровневого децентрализованного группового управления в условиях конфликта и кооперации".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданова В.Г., Пашинин А.А. Инструментальные средства автоматизации разработки научных сервисов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-1. С. 109–117.
2. Бычков И.В., Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Интеллектуализация децентрализованного управления распределенными вычислениями // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 10. С. 35–42. DOI: 10.14489/vkit.2017.10.
3. Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН. Режим доступа: <http://hpc.icc.ru/> (дата обращения 31.01.2018).
4. Опарин Г.А., Богданова В.Г. РЕБУС - интеллектуальный решатель комбинаторных задач в булевых ограничениях // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2008. Т. 6. № 1. С. 61–69.
5. Опарин Г.А., Богданова В.Г., Пашинин А.А. Сервис-ориентированные средства распределенного решения декомпозируемых вычислительных задач // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 4. С. 52–61.
6. Balderrama J.R., Simonin M., Tedeschi C. GinFlow: A Decentralised Adaptive Workflow Execution Manager // 30th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium, May 2016, Chicago, United States. Proceedings of the 30th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium.
7. Brueckner S., Czup H. Organization, Self-Organization, autonomy and emergence: States and challenges. International Transactions on systems Science and Applications 2. 1-9 (2006)
8. Buguillo J. Self-organization Self-organizing Coalitions for Managing Complexity. // Springer International Publishing. 2018. Chapter 6. P. 89-100. DOI: 10.1007/978-3-319-69898-4.
9. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. The Applied Problems Solving Technology Based on Distributed Computational Subject Domain Model: a Decentralized Approach // Proceedings XII International Conference "Parallel Computing Technologies" (Rostov-on-Don, April 2-6, 2018). Chelyabinsk. Publishing Centre of South Ural State University. 2018. С. 34–48.
10. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Automation Development Framework of Scalable Scientific Web Applications Based on Subject Domain Knowledge // Malyshkin V. (eds) Parallel Computing Technologies. PaCT 2017. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, 2017, Vol. 10421.
11. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management// XII International Symposium Intelligent Systems 2016 (INTELS 2016), October 5-7, 2016, Moscow, Russia. Procedia Computer Science. 2017. Vol. 103. Pp. 162–167.
12. Chaos A., Aldana M., Espinosa-Soto C., B. G. P. de Leon, Arroyo A. G., Alvarez-Buylla E. R. From Genes to Flower Patterns and Evolution: Dynamic Models of Gene Regulatory Networks // Journal of Plant Growth Regulation. Vol. 25. No. 4. Pp. 278–289.

13. Dubrova E., Teslenko M., Martinelli A. Kauffman networks: Analysis and applications // IEEE/ACM International conference on Computer-aided design, IEEE Computer Society. 2005. Pp. 479–484. DOI: 10.1109/ICCAD.2005.1560115
 14. Fernández H., Priol T., Tedeschi C. Decentralized approach for execution of composite Web services using the chemical paradigm // Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Web Services, Miami, FL. Jul. 2010.
 15. Gorodetskii V.I. Self-organization and multiagent systems: I. Models of multiagent self-organization // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2012. Vol. 51. Issue 2. Pp. 256–281.
 16. Keil D., Goldin D. Indirect Interaction in Environments for Multi-agent Systems // Weyns D., Van Dyke Parunak H., Michel F. (eds) Environments for Multi-Agent Systems II. E4MAS 2005, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. 2006. Vol. 3830.
 17. Moussaid M., Garnier S., Theraulaz G., Helbing D. Collective Information Processing and Pattern Formation in Swarms, Flocks, and Crowds // Top Cogn Sci. 2009. Vol. 1 (3). Pp. 469–497.
 18. Rodrigues N., Leitão P., Oliveira E. Dynamic Composition of Service Oriented Multi-agent System in Self-organized Environments // Proceedings of the 2014 Workshop on Intelligent Agents and Technologies for Socially Interconnected Systems, IAT4SIS '14 , Prague, Czech Republic. 2014. Pp. 1–6.
-

UDK 004.421+004.4'2+004.771

**DEVELOPMENT OF SELF-ORGANIZING MULTIAGENT SYSTEM
FOR DECENTRALIZED CONTROL BY DISTRIBUTED SOLUTION
OF APPLIED PROBLEMS**

Vera G. Bogdanova

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Senior researcher, e-mail: bvg@icc.ru

Anton A. Pashinin

Junior researcher, e-mail: apcrol@gmail.com

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences, Lermontov str., 134, Post Box 292 664033, Irkutsk, Russia

Abstract. We offer the technology of developing an intelligent multi-agent solver for non-procedural statements of computational problems on a distributed computational model of the subject domain. A microservices-oriented approach is used to organize computations based on the semantic interaction of solver-applied agents. A finite-automaton model of the dynamics of the functioning of the solver's agents is given. The offered technology is demonstrated using the example of constructing a distributed solver for a study the behavior of trajectories of autonomous binary dynamical systems.

Keywords: multi-agent system, service, service composition management, discrete-event model, feedback.

References

1. Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Instrumental'nyye sredstva avtomatizatsii razrabotki nauchnykh servisov [Tools for science services development automation] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* = Information and mathematical technologies in science and management. 2016. no. 4-1. Pp. 109–117. (in Russian)
2. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Intelktualizatsiya decentralizovannogo upravleniya raspredelennymi vychisleniyami [Intellectualisation of decenterlysed distributed computing management] // *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* = Herald of computer and information technologies. 2017. vol. 10. Pp. 35–42. DOI: 10.14489/vkit.2017.10 (in Russian)
3. Irkutsk Supercomputer Center of SB RAS. Available at: <http://hpc.icc.ru/> , accessed: 31-Jan-2018. (in Russian)
4. Oparin G.A., Bogdanova V.G. REBUS - intelligent solver for combinatorial problems in boolean constraints // *Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta: Seriya Informacionnye Tekhnologii*. 2008. Vol.6. no. 1. Pp. 61–69. (in Russian)
5. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Servis-oriyentirovannyye sredstva raspredelennogo resheniya dekompoziruyemykh vychislitel'nykh zadach [Service-oriented tools for distributed solution of decomposable computing tasks] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* = Information and mathematical technologies in science and management. 2017. Vol. 4. Pp. 52–61. (in Russian)
6. Balderrama J. R., Simonin M., Tedeschi C. GinFlow: A Decentralised Adaptive Workflow Execution Manager. 30th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium, May 2016, Chicago, United States. Proceedings of the 30th IEEE International Parallel & Distributed Processing Symposium.
7. Brueckner S., Czap H. Organization, Self-Organization, Autonomy and Emergence: States and Challenges. *International Transactions on systems Science and Applications* 2, 1-9 (2006)
8. Buguillo J. Self-organization. *Self-organizing Coalitions for Managing Complexity*. Chapter 6. 2018. Pp. 89–100, DOI: 10.1007/978-3-319-69898-4.
9. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. The Applied Problems Solving Technology Based on Distributed Computational Subject Domain Model: a Decentralized Approach // *Proceedings XII International Conference "Parallel Computing Technologies"* (Rostov-on-Don, April 2-6, 2018). Chelyabinsk. Publishing Centre of South Ural State University. 2018. C. 34–48.
10. Bychkov I.V., Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A., Gorsky S.A. Automation Development Framework of Scalable Scientific Web Applications Based on Subject Domain Knowledge. Malyshkin V. (eds) *Parallel Computing Technologies. PaCT 2017. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Cham. vol. 10421.
11. Bychkov I., Oparin G., Tchernykh A., Feoktistov A., Bogdanova V., Gorsky S. Conceptual Model of Problem-Oriented Heterogeneous Distributed Computing Environment with Multi-Agent Management. *XII International Symposium Intelligent Systems 2016 (INTELS 2016)*, October 5-7, 2016, Moscow, Russia. *Procedia Computer Science*. 2017. vol. 103, Pp. 162–167.

12. Chaos A., Aldana M., Espinosa-Soto C., B. G. P. de Leon, Arroyo A. G., Alvarez-Buylla E. R. From Genes to Flower Patterns and Evolution: Dynamic Models of Gene Regulatory Networks. *Journal of Plant Growth Regulation*. 2006. vol. 25. no. 4. Pp. 278–289.
13. Dubrova E., Teslenko M., Martinelli A. Kauffman networks: Analysis and applications. *IEEE/ACM International conference on Computer-aided design*. IEEE Computer Society. 2005. Pp. 479–484, DOI: 10.1109/ICCAD.2005.1560115
14. Fernández H., Priol T., Tedeschi C. Decentralized approach for execution of composite Web services using the chemical paradigm. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Web Services*, Miami, FL, Jul. 2010.
15. Gorodetskii V.I. Self-organization and multiagent systems: I. Models of multiagent self-organization. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2012. vol. 51. issue 2. Pp. 256–281.
16. Keil D., Goldin D. Indirect Interaction in Environments for Multi-agent Systems. Weyns D., Van Dyke Parunak H., Michel F. (eds) *Environments for Multi-Agent Systems II. E4MAS 2005*, Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg. 2006. vol. 3830.
17. Moussaid M., Garnier S., Theraulaz G., Helbing D. Collective Information Processing and Pattern Formation in Swarms, Flocks, and Crowds. *Top Cogn Sci*, vol. 1 (3). 2009. Pp. 469–497.
18. Rodrigues N., Leitão P., Oliveira E. Dynamic Composition of Service Oriented Multi-agent System in Self-organized Environments. *Proceedings of the 2014 Workshop on Intelligent Agents and Technologies for Socially Interconnected Systems, IAT4SIS '14*. Prague. Czech Republic. 2014. Pp. 1–6.