

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-87-97>

УДК 681.5.09

Организация процессов решения функциональных задач в мультиагентных системах

Кандидаты техн. наук, доценты А. В. Гулай¹⁾, В. М. Зайцев¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. При разработке технологий управления производственно-техническими системами наблюдается тенденция к использованию принципов мультиагентности, которые отражают развитие системной концепции распределенной обработки вещества, энергии и информации. Для выполнения работ и решения целевых функциональных задач в мультиагентных системах предполагается задействование параллельно функционирующих системных объектов, которые в определенной мере наделяются субъектными правами и играют роль исполнительных агентов. За счет введения компонентов интеллектуального управления составными частями проектируемой системы реализуются процессы их индивидуального и группового функционирования. С учетом этого в статье проанализированы основные схемы организации процессов решения функциональных задач и предложены показатели эффективности применения мультиагентных технологий. В частности, рассмотрен вариант решения несвязанных системных задач с использованием однотипных исполнительных агентов. Показана возможность применения однотипных агентов для решения многовариантных задач с последующим получением консолидированных результатов. Приведен также вариант предварительной декомпозиции задач на отдельные логически завершенные фазы и дальнейшего получения агрегированного результата. Представлен подход к решению функциональных задач на основе конвейерной параллельно-последовательной реализации их отдельных стадий и последующего отбора адекватного результата. В качестве показателей эффективности применения мультиагентных технологий к решению системных задач предложены и проанализированы характеристики, основанные на оценке времени и вероятности получения корректных результатов. Так, группа показателей, характеризующих процесс решения, включает общее время выполнения задач группой агентов, а также коэффициент компрессии в виде отношения среднего значения времени одноагентного последовательного решения набора задач к нормативному времени их мультиагентного исполнения. Рассматриваемый процесс характеризуется также расчетной вероятностью обеспечения необходимого множества решений за заданное нормативное время и вероятностью получения множества корректных результатов при многократном параллельном решении задачи с использованием группы агентов.

Ключевые слова: принцип мультиагентности, распределенная система, интеллектуальное управление, исполнительный агент, коллективное поведение, декомпозиция задач, синхронизация действий, агрегированный результат, коэффициент компрессии

Для цитирования: Гулай, А. В. Организация процессов решения функциональных задач в мультиагентных системах / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 2. С. 87–97. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-87-97>

Organization of Processes for Solving Functional Problems in Multi-Agent Systems

A. V. Gulay¹⁾, V. M. Zaitsev¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. When developing technologies for managing production and technical systems, there is a tendency to use the principles of multi-agency, which reflect the development of the system concept of distributed processing of matter, energy and

Адрес для переписки

Гулай Анатолий Владимирович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: + 375 17 293-91-85
is@bntu.by

Address for correspondence

Gulay Anatoly V.
Belorussian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: + 375 17 293-91-85
is@bntu.by

information. To perform work and solve target functional tasks in multi-agent systems, it is assumed that parallel functioning system objects are involved, which to a certain extent are endowed with subjective rights and play the role of executive agents. By introducing components of intelligent control of the components of the designed system, the processes of their individual and group functioning are implemented. With this in mind, the article analyzes the main schemes for organizing processes for solving functional tasks and suggests indicators of the efficiency of multi-agent technologies use. In particular, a variant of solving unrelated system tasks using the same type of executive agents is considered. The possibility of using the same type of agents to solve multivariate problems with subsequent consolidated results is shown. A variant of preliminary decomposition of tasks into separate logically completed phases and further obtaining an aggregated result is also given. An approach to solving functional tasks based on a parallel-sequential conveyor implementation of their individual stages and subsequent selection of an adequate result is presented. As indicators of the effectiveness of the application of multi-agent technologies to solving system problems, characteristics based on the assessment of time and probability of obtaining correct results are proposed and analyzed. Thus, the group of indicators characterizing the solution process includes the total time for completing tasks by a group of agents, as well as the compression coefficient in the form of the ratio of the average time of a single-agent sequential solution of a set of tasks to the standard time of their multi-agent execution. The process under consideration is also characterized by the calculated probability of providing the necessary set of solutions in a given standard time and the probability of obtaining a set of correct results with multiple parallel solutions of the problem using a group of agents.

Keywords: principle of multiagency, distributed system, intelligent management, executive agent, collective behavior, task decomposition, synchronization of actions, aggregated result, compression coefficient

For citation: Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2025) Organization of Processes for Solving Functional Problems in Multi-Agent Systems. *Science and Technique*. 24 (2), 87–97. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-2-87-97> (in Russian)

Введение

В проектировании систем управления производственно-технического назначения в настоящее время наблюдается существенное видоизменение методологической платформы их архитектурного построения. Оно выражается в смещении организации решения требуемого набора целевых системных задач по обработке или преобразованию вещества, энергии и информации в направлении использования принципов мультиагентности [1–4]. Для выполнения работ и решения задач в мультиагентных системах предполагается широкое задействование групп параллельно функционирующих системных объектов, которые получили наименование исполнительных агентов.

Рассматриваемая концепция мультиагентности охватывает следующие аспекты формирования указанных систем [5–7]:

- теоретические основы индивидуализированного аппаратно-программного построения агентов с возможностью последующего их объединения в группы с элементами коллективного поведения;
- архитектурные аспекты создания мультиагентных систем и принципы управления процессами индивидуального и группового функционирования агентов;
- методы и средства поддержки мобильности и групповой целостности исполнительных агентов;

- процессы составления планов совместных действий агентов в группах и их синхронизации;

- приемы разрешения возможных конфликтов частных целей и действий агентов в группах;

- процедуры выполнения агентами своих задач и функциональной локализации избытка агентов с учетом требования минимизации взаимных помех;

- способы обеспечения физической и информационной безопасности групп исполнительных агентов.

Необходимо отметить также, что реальное проявление эффективности рассматриваемых мультиагентных технологий следует ожидать в том случае, если выполняемые работы или задачи имеют однородную системную направленность и принадлежат к общей проблемной области или к области взаимного пересечения, наложения определенных предметных направлений (например, информационного, математического, технического, военного, геодезического, топографического, строительного, медицинского, экологического и других). Кроме того, работам и задачам должен быть свойственен позитивный отклик на концентрацию материальных и информационных усилий группы агентов, привлекаемых к решению задач или к решению отдельных составных частей выполняемых заданий. В наиболее благоприятном случае задачи должны допускать декомпози-

цию на некоторое количество самостоятельных подзадач, которые могут рассматриваться как отдельные фазы работ для достижения общего решения на поднаборах начальных условий и попарно непересекающихся поднаборах исходных данных.

Анализ научно-технических источников показывает, что существенные результаты по созданию распределенных многоагентных технологий могут быть достигнуты в области передачи и обработки информации [6, 7]. Однако, несмотря на значительный объем теоретических и прикладных работ, выполненных на данном проблемном направлении, остается открытым вопрос общего формального описания категорий системных задач и выделения наборов признаков, при которых могут быть получены ощутимые преимущества мультиагентного распараллеливания работ в различных приложениях [8–11]. Кроме того, недостаточно проработаны методы предварительной оценки коллективного функционального потенциала групп агентов, что необходимо для спецификаций, расчетов и сопоставления показателей эффективности применения рассматриваемых технологий. С учетом этого в статье проанализированы основные схемы организации процессов решения функциональных задач и предложены показатели эффективности применения мультиагентных технологий.

Концепция применения мультиагентных технологий в решении системных задач

В качестве показателей эффективности применения мультиагентных технологий к выполнению набора работ или к решению системных задач $\{Z_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, M$ – номер задачи) при распараллеливании процессов их решения между Q агентами выбираются следующие характеристики:

- общее требуемое или нормативно заданное время $T(Z, X, M, Q)$ обеспечения параллельного выполнения M работ или решения M задач из общего набора Z при использовании начальных условий и исходных данных X группой из Q агентов;
- расчетная вероятность $P_{ZMQ}(Q)$ обеспечения необходимого множества решений R_{ZMQ} , адекватных начальным условиям и исходным

данным для набора работ или задач, за заданное нормативное время $T(Z, X, M, Q)$;

- коэффициент компрессии $K(Z, X, M, Q)$ в виде отношения среднего значения времени одноагентного последовательного решения набора задач $T(Z, X, M, Q = 1)$ к нормативному времени $T(Z, X, M, Q)$ их многоагентного решения с учетом времени выполнения процедур управления агентами и закрепления за ними конкретных работ или задач;

- вероятность $P(Z_i, m, Q)$ получения не менее m корректных решений определенной задачи Z_i при ее Q -кратном параллельном решении с использованием Q агентов.

Возможно выделение следующих категорий задач (A–D), принципиально допускающих эффективное применение мультиагентных технологий [4].

A. Набор самостоятельных задач $\{Z_i\}$ с номерами i , которые реализуют несвязанные индивидуальные методы и алгоритмы выработки решений $\{F_i\}$ и, следовательно, в принципе допускают последующее их параллельное решение на наборах индивидуальных начальных условий и исходных данных $\{X_i\}$ с нахождением множества результатов

$$R_{ZMQ} = \{R_i(Z_i, X_i)\}.$$

B. Самостоятельная многовариантная задача Z_j (с номером j), имеющая некоторый алгоритм решения F_j и требующая параллельного нахождения результатов решений для различных вариантов X_w начальных условий и исходных данных $X = \{X_w\}$, $w = 1, 2, \dots, W$ – номер варианта. Последующее формальное объединение этих результатов приводит к получению консолидированного решения

$$R_{ZWQ} = \{R_w(Z, X_w)\}.$$

C. Самостоятельная многофазовая задача Z_j (с номером j), допускающая декомпозицию на N самостоятельных подзадач $Z_j = \{z_{jk}\}$, которые рассматриваются как отдельные фазы работ для достижения общего решения R_{ZNQ} , последующее параллельное решение подзадач на поднаборах начальных условий и попарно непересекающихся поднаборах исходных данных $X_N = \{X_k\}$; $X_k \cap X_{kq} = \emptyset$; $k, q = 1, 2, \dots, N$ с объ-

единением результатов в общее агрегированное решение

$$R_{ZNO} = \bigcup_{j=1}^N \alpha_j R_j(z_j, x_j),$$

где α_j – коэффициенты композиции.

Разбиение системной задачи на отдельные, разрозненные фазы называют процессом «сгибания».

Среди задач категории **C** выделяется крайне важный в прагматическом отношении вариант, когда формируемые результаты выполнения очередной фазы являются исходными для выполнения последующей фазы и требования $X_k \cap X_q = \emptyset$ либо вообще не выполняются, либо выполняются только для отдельных сочетаний начальных условий и исходных данных k, q . В этом случае «сгибание» в общем плане невозможно, однако при поточном характере поступления в систему требований на решение задачи Z может быть организован последовательно-параллельный режим конвейерного функционирования Q агентов по обработке потоков требований и достигнут определенный позитивный эффект.

D. Отдельная работа, задача Z_j или ее подзадача z_{jk} , для выполнения которой требуется организация параллельного Q -кратного решения с целью получения не менее m корректных результатов, их последующего сопоставления и отбора для повышения результирующей вероятности выработки адекватного решения $P_{Z \text{ рез}}$ или $P_{z_k \text{ рез}}$.

Здесь и далее при описании задач **B, C, D** используется обозначение номера задачи j с тем, чтобы особо подчеркнуть, что многовариантная, многофазовая задача Z_j (с номером j) может быть элементом множества задач $\{Z_i\}$.

Для предварительной оценки показателей эффективности применения мультиагентных технологий к решению набора системных задач $\{Z_i\}$ объективно требуется проведение предварительных эмпирических и экспертных исследований процессов выполнения работ или решения задач в одноагентном режиме. Целью таких исследований является построение интервалов распределения $\{T_{i \min}, T_{i \max}\}$ значений длительности выполнения работ или решения задач, адекватных начальным условиям и ис-

ходным данным, а также сглаживающих распределений этих значений в виде функций плотности распределения вероятности $\{f_i(t)\}$.

Как правило, в технологию построения системы вводится процедура обязательного предварительного контроля корректности исходных условий и данных для исполнения того или иного процесса, а также контроля общего времени реализации отдельных процессов. Этот контроль осуществляется с помощью средств оценки корректности и непротиворечивости сведений на входах процессов и средств предотвращения заикливания. Эксперименты по выполнению реальных работ или по «прогону» реальных задач (а также их моделей) позволяют оценить границы интервалов распределений $\{T_{i \min}, T_{i \max}\}$. Под процедурой «прогона» здесь понимается процесс однократного решения конкретной системной задачи от начала до конца.

В ряде случаев параметры $T_{i \min}$ могут соответствовать моментам времени «отсечки» процессов решения задач при выявлении некорректностей исходных условий и данных, а параметры $T_{i \max}$ – моментам времени «отсечки» процессов при выявлении фактов наиболее вероятного заикливания. «Отсечкой» в подобных случаях называется принудительное снятие процесса решения системной задачи с исполнения при угрозе заикливания. Введение процедуры «отсечки» приводит к тому, что в качестве распределения времени корректного решения задач при проведении системного анализа необходимо применять распределения $\{f_i^*(t)\}$, усеченные на интервалах $\{T_{i \min}, T_{i \max}\}$. Они формируются с помощью процедур интервального усечения, предварительно подобранных экспертами сглаживающих распределений $\{f_i(t)\}$.

Если в результате экспериментов получены данные, которые позволяют по правилам их статистической обработки апостериорно вычислить средние значения и дисперсии $\{M_{ti}^*, D_{ti}^*\}$ усеченных распределений времени решения отдельных задач, то методом выравнивания первого осевого и второго центрального моментов могут быть подобраны средние значения и дисперсии $\{M_{ti}, D_{ti}\}$ для сглаживающих и

в дальнейшем усекаемых распределений $\{f_i(t)\}$. Усеченные распределения связаны с апостериорными усекаемыми распределениями соотношениями, известными из теории вероятностей [12]:

$$f_i^*(t) = 0, \text{ если } t \leq T_{i \min} \text{ или } t \geq T_{i \max};$$

$$f_i^*(t) = A f_i(t), \text{ если } T_{i \min} \leq t \leq T_{i \max};$$

$$A = [F_i(T_{i \max}) - F_i(T_{i \min})]^{-1}; \quad F_i(t) = \int_{-\infty}^t df_i(t).$$

В качестве начальных значений в процедуре подбора параметров усекаемых распределений целесообразно применять значения $M_{i \text{ и}} = A M_{i i}^*$,

$D_{i \text{ и}} = A D_{i i}^*$, которые подлежат итерационному уточнению.

Решение несвязанных задач с использованием системы однотипных агентов

Рассмотрим параметры процесса многоагентного выполнения работ или решения задач категории **A** при условии высокой функциональной надежности однотипных или специализированных агентов и при $Q \geq M$. Корректность приводимых рассуждений сохраняется также в том случае, если $Q < M$, но при этом для динамического перераспределения агентов по работам или задачам рассматривается применение исключительно однотипных агентов, а также дополнительно выполняется разбиение общего множества задач Z на несколько последовательно обрабатываемых подмножеств

с последующим формированием результатов итогового расчета.

Применение многоагентной технологии потенциально позволяет обеспечить достижение эффекта ускорения общего процесса решения набора задач категории **A**, который выполняется по следующей схеме (рис. 1):

⟨ Несвязанный набор задач + Несвязанный набор исходных данных ⟶

⟶ Множество функционально однотипных или специализированных агентов ⟶

⟶ Множество результатов параллельного решения задач исходного набора ⟩.

Для обеспечения заданного нормативного времени $T(Z, X, M, Q)$ выполнения работ или решения M задач из их полного набора Z при использовании группы из Q параллельно функционирующих агентов должно выполняться следующее основополагающее соотношение баланса времени по каждому из агентов:

$$T_i \leq T(Z, X, M, Q),$$

где T_i – время выполнения работы соответствующим агентом или решения им задачи $z_i \in Z$ с получением результата, адекватного начальным условиям и исходным данным.

Если $P_i[T_i \leq T(Z, X, M, Q)]$ – вероятности обеспечения в системе индивидуальных значений времени решения отдельных задач, не превышающих установленного нормативного значения, то для всего набора из M задач расчетная вероятность $P_{ZMQ}(Q)$ составит

$$P_{ZMQ}(Q \geq M) = \prod_{i=1}^M P_i[T_i \leq T(Z, X, M, Q)].$$



Рис. 1. Схема решения набора несвязанных задач с использованием системы однотипных агентов

Fig. 1. Scheme for solving a set of unrelated problems using a system of similar agents

Следует отметить, что из анализа результатов предварительных эмпирических и экспертных исследований процессов решения задач в одноагентном режиме следует соотношение

$$P_{ZMQ}(Q \geq M) = \prod_{i=1}^M \{F_i^*[T_i = T(Z, X, M, Q)] - F_i^*[T_i = T_{i \min}]\},$$

$$F_i^*(t) = \int_{-\infty}^t df_i^*(t).$$

При проведении практического системного анализа рациональной технологической процедурой является замена аналитического интегрирования на численное интегрирование по методу трапеций или по иному методу, позволяющему найти и оценить расчетные вероятности $P_{ZMQ}(Q \geq M)$ обеспечения необходимого множества решений

$$R_{ZM} = \{R_i(Z_i, X_i)\},$$

за нормативный интервал времени $T(Z, X, M, Q)$

$$P_{ZMQ}(Q \geq M) \geq \prod_{i=1}^M \Delta t \cdot [f_{i1}^*(T_{i \min}) / 2 + \sum_{n=2}^{J-1} f_{in}^*(T_{i \min} + n \cdot \Delta t) + f_{iJ}^*(T_{i \min} + J \cdot \Delta t) / 2],$$

где $\Delta t = (T_{i \max} - T_{i \min}) / L$ – интервал времени численного интегрирования; $L = 10-12$ – количество интервалов численного интегрирования; $J = \text{Ant}_{(-)}\{[T(Z, X, M, Q) - T_{i \min}] / \Delta t\}$ – функция Антье для нижней целочисленной границы аргумента.

Оценка коэффициента компрессии $K(Z, X, M, Q \geq M)$ выполняется на основе расчета среднего значения времени $T(Z, X, M, Q = 1)$ одноагентного последовательного решения рассматриваемого набора задач. С этой целью с использованием метода численного интегрирования определяется значение указанного параметра

$$T(Z, X, M, Q = 1) = \sum_{i=1}^M \int_{T_{i \min}}^{T_{i \max}} t \cdot f_i^*(t) dt \approx$$

$$\approx \sum_{i=1}^M \Delta t \{f_{i1}^*(T_{i \min})[T_{i \min} / 2] +$$

$$+ \sum_{n=2}^{J-1} f_{in}^*(T_{i \min} + n \Delta t)[T_{i \min} + n \Delta t] +$$

$$+ f_{iJ}^*(T_{i \min} + J \cdot \Delta t) \cdot [T_{i \min} + J \cdot \Delta t] / 2\}.$$

Коэффициент компрессии $K(Z, X, M, Q \geq M)$ оценивается с использованием следующего выражения:

$$K(Z, X, M, Q \geq M) =$$

$$+ T(Z, X, M, Q = 1) \cdot [T(Z, X, M, Q) + t_{\text{упр}}]^{-1},$$

где $t_{\text{упр}}$ – ожидаемые усредненные затраты времени на выполнение процедур управления агентами в расчете на одну задачу. В идеальном случае при $Q \geq M$ и $t_{\text{упр}} \rightarrow 0$ желательное достижение этим коэффициентом значения, близкого к количеству задач в наборе: $K(Z, X, M, Q \geq M) \rightarrow M$.

Если $Q < M$, то при заданном нормативном значении $T(Z, X, M, Q)$ в качестве верхней границы $T(Z, X, M, Q < M)$ допустимого времени решения задач используется следующее выражение:

$$T(Z, X, M, Q < M) = G^{-1} \cdot T(Z, X, M, Q),$$

где $G = \text{Ant}_{(+)}\{M / Q\}$ – функция Антье для верхней целочисленной границы количества подмножеств задач, внутри которых отдельные задачи могут параллельно обрабатываться агентами. Эти подмножества задач имеют индивидуальные мощности не выше Q и входят в полное множество задач с мощностью M .

Анализируемая система может состоять из однотипных агентов в смысле их способности решения любых задач рассматриваемого набора. Основополагающее соотношение баланса времени в этом случае принимает вид

$$T_i \leq T(Z, X, M, Q < M),$$

где T_i – время получения адекватного решения задачи $z_i \in Z$ соответствующим агентом. При этом

$$P_{ZMQ}(Q < M) \geq \prod_{k=1}^G \prod_{i_k=1}^{Q < M} \Delta t \cdot \{f_{i_k1}^*(T_{i_k \min}) / 2 +$$

$$+ \sum_{n=1}^{J-1} f_{i_k n}^*(T_{i_k \min} + n \Delta t) + f_{i_k J}^*(T_{i_k \min} + J \Delta t) / 2\},$$

$$K(Z, X, M, Q < M) =$$

$$= T(Z, X, M, Q = 1) \cdot G \cdot [T(Z, X, M, Q) + t_{\text{упр}}]^{-1}.$$

Для исключения возможных негативных влияний на функциональные процессы избыточных и образующихся в процессе решения задач незадействованных («свободных») агентов их целесообразно своевременно выводить из рабочей зоны или принудительно блокировать до момента возникновения потребности в использовании. Это положение целесообразно соблюдать при решении задач всех категорий.

Применение однотипных агентов в решении задачи с консолидацией результатов

Рассмотрим параметры процесса многоагентного решения задач категории **В** при тех же условиях, что и в случае категории **А**, но только для набора однотипных агентов в смысле возможности решения любых вариантов рассматриваемой задачи. Некоторая задача z_j может требовать нахождения результатов решений для различных вариантов X_w начальных условий и исходных данных $X = \{X_w\}$. Эффект ускорения общего процесса решения вариантов задачи достигается при организации выполнения работ по следующей схеме (рис. 2):

⟨ Конкретная функциональная задача + Набор вариантов исходных данных →
→ Множество функционально однотипных агентов →
→ Множество вариантов решений → Консолидация вариантов решений ⟩.

Эта категория задач является частным случаем задач категории **А**, но имеет особенно-

сти системного анализа и проведения расчетов.

Рассмотрим условия обеспечения заданного нормативного времени $T(z_j, X, W, Q)$ решения задачи z_j для набора вариантов W начальных условий и исходных данных при использовании группы агентов высокой функциональной надежности и однотипности $Q \geq W$. По каждому из вариантов должно выполняться следующее основополагающее соотношение баланса времени:

$$T_w \leq T(z_j, X, W, Q).$$

Если $P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]$ – вероятность обеспечения в системе длительности решения отдельных вариантов задачи z_j , не превышающей нормативное значение, то для оценки вероятности $P_{ZW}(z_j, Q \geq W)$ обеспечения нормативного времени решения по всему набору вариантов W могут применяться соотношения, получаемые на основе численного интегрирования. Эти соотношения имеют следующий вид:

$$P_{ZW}(z_j, Q \geq W) = \prod_{w=1}^W P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)] = \\ = \prod_{j=1}^W \Delta t \{ f_{j1}^*(T_{j\min}) / 2 + \sum_{n=2}^J f_{jn}^*(T_{j\min} + n\Delta t) + \\ + f_{jJ}^*(T_{j\min} + J\Delta t) / 2 \},$$

где $J = \text{Ant}_{(-)}\{[T(z_j, X, M, Q) - T_{j\min}] / \Delta t\}$ – функция Антье для нижней целочисленной границы аргумента.



Рис. 2. Схема применения однотипных агентов в решении отдельной задачи с консолидацией результата

Fig. 2. Scheme for using agents of the same type in solving a separate problem with consolidation of the result

При однородности внутреннего содержания вариантов решений рассматриваемой задачи можно ожидать, что вероятности $P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]$ будут достаточно близкими для отдельных вариантов и могут быть представлены их общей нижней границей:

$$\begin{aligned} \inf P[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)] &= \\ &= \min \{P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]\}. \end{aligned}$$

В силу этого

$$P_{ZW}(z_j, Q \geq W) \geq \{\inf P_w[T_w \leq T(z_j, X, W, Q)]\}^W.$$

В последующем выполняется формальное объединение результатов и получение с вероятностью $P_{ZW}(z_j, Q \geq X)$ консолидированного решения за установленный интервал времени $T(z_j, X, W, Q)$:

$$R_{ZWQ} = \bigcup_{w=1}^W R_w(z_j, X_w).$$

При $Q < W$ основополагающее соотношение баланса времени принимает следующий вид:

$$T_j \leq T(z_j, X, W, Q < W) = G^{-1} \cdot T(z_j, X, W, Q),$$

где T_j – время получения адекватного решения задачи $z_j \in Z$ соответствующим агентом; $G = \text{Ant}_{(+)}\{W / Q\}$ – функция Антье для верхней целочисленной границы аргумента.

При этом

$$\begin{aligned} P_{ZW}(Q < W) &\geq [\Delta t \{f_{j k 1}(T_{j k \min}) / 2 + \\ &+ \sum_{n=2}^{J-1} f_{j k n}(T_{j \min} + n\Delta t) + f_{j k J}(T_{j \min} + J\Delta t) / 2\}]^{GQ}; \end{aligned}$$

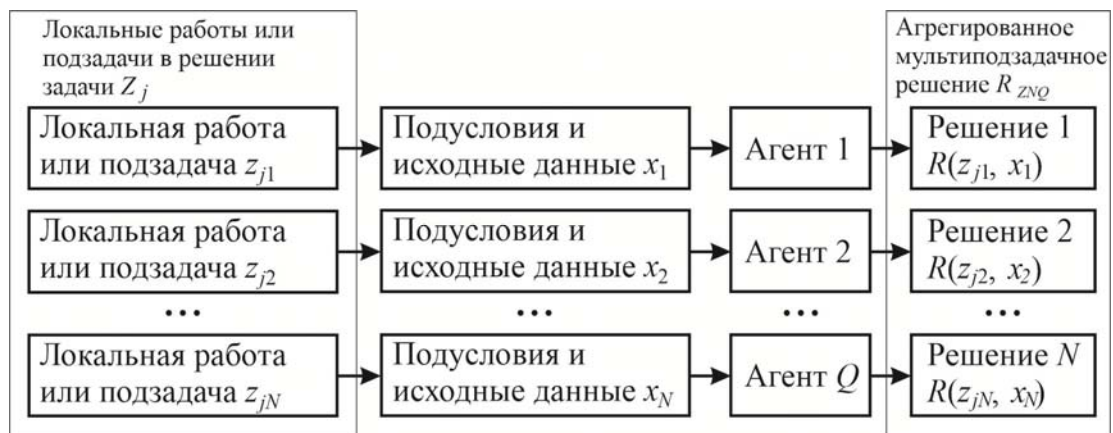


Рис. 3. Схема агрегирования результата мультиагентного решения при декомпозиции задачи на отдельные фазы

Fig. 3. Scheme for aggregating the result of a multi-agent solution when decomposing a problem into separate phases

$$K(Z, X, W, Q < M) =$$

$$= T(z_j, X, W, Q = 1) \cdot G \cdot [T(z_j, X, W, Q \leq MD) + t_{\text{упр}}]^{-1}.$$

Консолидация результата решения при декомпозиции задачи на отдельные фазы

Процесс многоагентного решения задач категории С предполагает декомпозицию каждой задачи Z_j на самостоятельные подзадачи $Z_j = \{z_{jk}\}$, а также последующее параллельное решение подзадач на поднаборах начальных условий и исходных данных $X_j = \{x_{jk}\}$ по следующей схеме (рис. 3):

⟨ Конкретная функциональная задача →
→ Набор самостоятельных подзадач (фаз) +
+ Множество поднаборов начальных условий и исходных данных →
→ Множество функционально однотипных или специализированных агентов →
→ Множество решений подзадач → Агрегированное решение ⟩.

Решение рассматриваемой категории задач для случая $Q < N_j$ значимого технического смысла не имеет (здесь N_j – количество фаз в расщеплении задачи Z_j , которое устанавливается системным аналитиком). В случае $Q \geq N_j$ результирующее решение представляется в композиционной форме с коэффициентами композиции α_j :

$$R_{ZNQ} = \bigcup_{j=1}^N \alpha_j \cdot R_j(z_j, x_j).$$

Решение должно быть сформировано за установленное нормативное время $T(z_j, x_j, N_j, Q)$ с вероятностью

$$P_{ZN}(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = \prod_{k=1}^{N_j} P_j[T_j \leq T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q \geq N_j)]$$

и коэффициентом компрессии

$$K(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = T(z_j, x_j, N_j, Q = 1) \times [T(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) + t_{\text{упр}}]^{-1}.$$

В представленных выражениях $T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q)$ – нормативное время выполнения k -й фазы. Нормативное время решения задачи Z_j определяется в данном случае следующим образом:

$$T(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = \max\{T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q \geq N_j), k = 1, 2, \dots, N_j,$$

$$T(z_j, x_j, N_j, Q = 1) = \sum_{k=1}^{N_j} T(z_{jk}, x_{jk}, N_j, Q \geq N_j).$$

Вероятностные соотношения определяются следующими процедурами численного интегрирования:

$$P_j[T_j \leq T(z_j, x_j, N, Q \geq N)] = \prod_{k=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{L_{jk}} \Delta t \cdot [f_{jk1}^*(T_{j\min} + \sum_{q=1}^{k-1} \Delta t \cdot L_{jq}) / 2 + \sum_{n=1}^{L_{jk}-1} f_{jk n}^*(T_{j\min} + \sum_{q=1}^{k-1} \Delta t L_{jq} + L_{jk} \Delta t) + f_{jk n}^*(T_{j\min} + \sum_{q=1}^{k-1} \Delta t L_{jq} + L_{jk} \Delta t) / 2],$$

где $\Delta t = (T_{j\max} - T_{j\min}) / \left(\sum_{k=1}^{N_j} L_{jk} \right)$ – интервал

времени численного интегрирования фаз задачи Z_j ; $L_{jk} = 10-12$ – количество интервалов численного интегрирования фазы z_j .

Для задач этой категории главным проблемным аспектом возможного применения мультиагентных технологий является расщепление задачи с произвольной структурой на отдельные

параллельные фазы. В научно-технической литературе опубликованы различные математические методы расщепления сетевых графов выполнения работ на блоки реализации параллельных фаз с минимальным количеством параметров взаимодействия. Кроме того, известны методы и приемы разбиения сетевых графов на параллельные блоки с близкими объемами выполняемых неделимых операций. Системный анализ возможностей практического использования этих методов показывает, что их эффективность существенно зависит от особенностей каждой задачи. При этом далеко не все задачи дают удовлетворительные результаты по расщеплению алгоритмов на фазы, которые допускают последующее масштабирование и агрегирование.

Конвейерное параллельно-последовательное выполнение фаз решения задачи

Более простым и в то же время более продуктивным вариантом является конвейерная обработка потока требований на решение задачи Z_j (вариант **D**). В данном случае длительность процедуры каждого решения задачи в многоагентном варианте соответствует времени ее решения при одноагентном представлении

$$T(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j) = T(z_j, x_j, N_j, Q = 1),$$

при этом общий эффект с указанным выше коэффициентом компрессии $K(z_j, x_j, N_j, Q \geq N_j)$ достигается только после «разгона» конвейерной системы в течение времени $T(z_j, x_j, N_j, Q = 1)$. В понятие «разгона» конвейерной системы вкладывается смысл последовательного подключения к параллельной работе всех ее агентов.

На рис. 4 представлена схема реализации обработки потока требований на решение задачи Z_j . Показано чередование фаз $\Phi_1-\Phi_4$ конвейерной параллельно-последовательной обработки потока требований для $Q = 4$. Внутри каждого требования происходит последовательное выполнение фаз решения задачи. Завершение любой фазы решения задачи сопровождается началом выполнения этой же фазы для следующей очередной задачи.

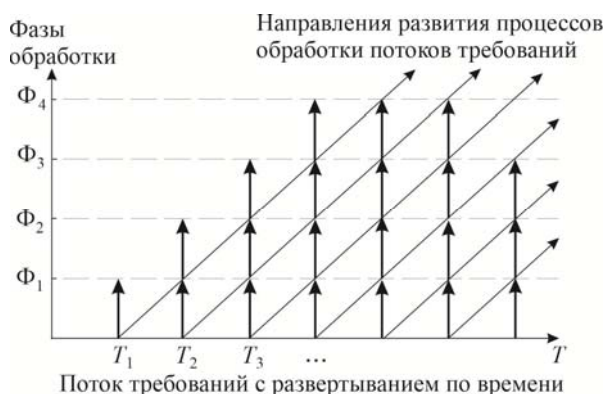


Рис. 4. Схема чередования фаз конвейерной параллельно-последовательной обработки потока требований

Fig. 4. Diagram of conveyor phase sequence for parallel-sequential processing of a stream requirements

Задачи категории **D** предусматривают параллельное Q -кратное решение задачи Z_j или ее подзадач z_{jk} с целью получения не менее m адекватных решений и повышения результирующей вероятности $P_{Z_{\text{рез}}}$ (или $P_{z_{k \text{ рез}}}$) выработки решений за установленный интервал времени T_Z (или $T_{z_{jk}}$):

$$P_{Z_{\text{рез}}} = \sum_{j=0}^{Q-m} C_Q^j \cdot [P_Z]^{Q-j} [1 - P_Z]^j;$$

$$P_{z_{k \text{ рез}}} = \sum_{j=0}^{Q-m} C_Q^j \cdot [P_{z_k}]^{Q-j} [1 - P_{z_k}]^j,$$

где P_Z , P_{z_k} – вероятности выработки адекватных результатов в случае однократного решения; C – количество сочетаний. При этом наблюдается эффект повышения вероятности успешной реализации процесса решения конкретной функциональной задачи или подзадачи за счет Q -кратного физического распараллеливания этого процесса и повторения решений.

ВЫВОДЫ

1. Проанализированы основные схемы организации процессов решения функциональных задач и предложены показатели эффективности применения мультиагентных технологий. В частности, рассмотрен вариант решения несвязанных системных задач с использованием

однотипных исполнительных агентов. Показана возможность применения однотипных агентов для решения многовариантных задач с последующим получением консолидированных результатов. Приведен вариант предварительной декомпозиции задач на отдельные логически завершённые фазы и дальнейшего получения агрегированного результата. Представлен подход к решению функциональных задач на основе конвейерной параллельно-последовательной реализации их отдельных стадий и последующего отбора адекватного результата.

2. Представлен подход к решению функциональных задач на основе конвейерной параллельно-последовательной реализации их отдельных стадий и последующего отбора адекватного результата. В качестве показателей эффективности применения мультиагентных технологий к решению системных задач предложены и проанализированы характеристики, основанные на оценке времени и вероятности получения корректных результатов. Так, группа показателей, характеризующих процесс решения, включает общее время выполнения задач группой агентов и коэффициент компрессии в виде отношения среднего значения времени одноагентного последовательного решения набора задач к нормативному времени их мультиагентного исполнения. Рассматриваемый процесс характеризуется также расчетной вероятностью обеспечения необходимого множества решений за заданное нормативное время и вероятностью получения множества корректных результатов при многократном параллельном решении задачи с использованием группы агентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбина, Г. В. Современные архитектуры динамических интеллектуальных систем: проблемы интеллектуализации и основные тенденции / Г. В. Рыбина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 1–12.
2. Карпов, В. Э. Модели социального поведения в групповой робототехнике / В. Э. Карпов // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2016. Вып. 59. С. 165–232.
3. Гулай, А. В. Построение интеллектуальных систем / А. В. Гулай, В. М. Зайцев. Минск: ИВЦ Минфина, 2022. 368 с.

4. Гулай, А. В. Сетевое информационное взаимодействие агентов роя: техническая и программная реализация / А. В. Гулай, В. М. Зайцев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2024. Т. 25, № 6. С. 295–305. <https://doi.org/10.17587/mau.25.295-305>.
5. Городецкий, В. И. Многоагентные системы (обзор) / В. И. Городецкий, М. С. Грушинский, А. В. Хабалов. URL: <https://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/>.
6. Зайцев, В. М. Организация распределенной обработки данных на вычислительных комплексах АСУ / В. М. Зайцев // Вопросы радиоэлектроники. Сер. общетехническая. 1982. Вып. 10. С. 26–32.
7. Тарасов, В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям / В. Б. Тарасов. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
8. Giorgini, P. Agent-Oriented Software Engineering IV: 4th International Workshop, AOSE 2003, Melbourne, Australia, July 15, 2003 / P. Giorgini, J. P. Müller, J. Odell. Berlin, Heidelberg: Springer, 2023. 247 p. <https://doi.org/10.1007/b95187>.
9. Towards Reliable Multi-Agent System: An Adaptive Replication Mechanism / Z. Guessoum, J.-P. Briot, N. Faci, O. Martin // Multiagent and Grid Systems. 2010. Vol. 6, No 1. P. 1–24. <https://doi.org/10.3233/mgs-2010-0139>.
10. Hübner, J. F. A Normative Programming Language for Multi-Agent Organizations / J. F. Hübner, O. Boissier, R. H. Bordini // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2011. Vol. 62, No 1. P. 27–53. <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9251-0>.
11. Dimensions in Programming Multi-Agent Systems / O. Boissier, R. H. Bordini, J. F. Hübner, A. Ricci // Knowledge Engineering Review. 2019. Vol. 34, No 2. P. 1–28. <https://doi.org/10.1017/s026988891800005x>.
12. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. М.: КноРус, 2010. 664 с.
2. Karpov V. E. (2016) Models of Social Behavior in Group Robotics. *Upravlenie Bolshimi Sistemami* [Management of Large Systems]. Moscow, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Is. 59, 165–232 (in Russian).
3. Gulay A. V., Zaitsev V. M. (2022) *Building Intelligent Systems*. Minsk: Information and Computing Center of Ministry of Finance of the Republic of Belarus. 368 (in Russian).
4. Gulay A. V. Zaitsev V. M. (2024) Network Information Interaction of Swarm Agents: Technical and Software Implementation. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 25 (6), 295–305. <https://doi.org/10.17587/mau.25.295-305> (in Russian).
5. Gorodetsky V. I., Grushinsky M. S., Khabalov A. V. (1998) Multi-Agent Systems (Review). Available at: <https://spkurdyumov.ru/networks/mnogoagentnye-sistemy-obzor/> (in Russian).
6. Zaitsev V. M. (1982) Organization of Distributed Data Processing on Automated Control System Computing Complexes. *Voprosy Radioelektroniki. Ser. Obshchetechnicheskaya = Questions of Radio Electronics. General Technical Series*, (10), 26–32 (in Russian).
7. Tarasov V. B. (2002) From Multi-Agent Systems to Intellectual Organizations. Moscow, Publishing House of Editorial URSS. 352 (in Russian).
8. Giorgini, P. Müller J. P., Odell J. (2003) Agent-Oriented Software Engineering IV. 4th International Workshop, AOSE 2003, Melbourne, Australia, July 15, 2003. Berlin, Heidelberg, Springer, 2023. 247. <https://doi.org/10.1007/b95187>.
9. Guessoum Z., Briot J.-P., Faci N., Marin O. (2010) Towards Reliable Multi-Agent System: An Adaptive Replication Mechanism. *Multiagent and Grid Systems*. 2010, 6 (1), 1–24. <https://doi.org/10.3233/mgs-2010-0139>.
10. Hübner J. F., Boissier O., Bordini R. H. (2011) A Normative Programming Language for Multi-Agent Organizations. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 62 (1), 27–53. <https://doi.org/10.1007/s10472-011-9251-0>.
11. Boissier O., Bordini R. H., Hübner J. F., Ricci A. (2019) Dimensions in Programming Multi-Agent Systems. *Knowledge Engineering Review*, 34 (2), 1–28. <https://doi.org/10.1017/s026988891800005x>.
12. Wentzel E. S. (2010) *Probability Theory*. Moscow, KnoRus Publ. 664 (in Russian).

Поступила 04.11.2024

Подписана в печать 21.01.2025

Опубликована онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Rybina G. V. (2017) Modern Architectures of Dynamic Intelligent Systems: Problems of Intellectualization and Main Trends. *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol, Diagnostika Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, (2), 1–12 (in Russian).

Received: 04.11.2024

Accepted: 21.01.2025

Published online: 31.03.2025