

«Зоосоциальная модель» представления архитектуры многоагентной системы

Ю.В. Дубенко¹, С.А. Подгорный², Е.Е. Дышкант¹, В.А. Демидов¹

¹ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

² Университет «Дубна», Дубна, Московская область, Россия

Аннотация. Архитектура многоагентной системы определяет основные принципы ее формирования и функционирования, включая формат организационной структуры, представляющей граф, в котором в качестве вершин выступают агенты, а связи между ними обозначают ребра. Общим недостатком существующих подходов к представлению архитектур многоагентных систем является поддержка не более двух типов организационных структур, среди которых может отсутствовать оптимальный для данных параметров окружающей среды. В данной работе предложен способ представления архитектуры многоагентной системы, реализованный путем заимствования механизмов живой природы, а именно - принципов организации сообществ животных. Предложенный подход позволяет моделировать организационные структуры следующих типов: «коалиция», «команда», «иерархическая структура», «федерация», «конгрегация». Для определения оптимальной архитектуры многоагентной системы, оптимальной для конкретных условий окружающей среды, возможно применение «генетического алгоритма».

Ключевые слова: многоагентная система, архитектура, агент, организационная структура, оптимизация.

Введение

Архитектура определяет основные принципы синтеза и функционирования многоагентной системы (МАС), такие как способ формирования организационной структуры (заранее заданная, статичная, или «спонтанно возникающая в результате взаимодействия между агентами»), представляющей множество связей между агентами (вертикальных, горизонтальных, постоянных, переменных); характер коммуникации агентов (непосредственная, опосредованная, ближняя, дистанционная); структуру принятия решения (полицентризм, моноцентризм) [1]. При этом могут быть сформированы следующие типовые организационные структуры: «коалиция» (объединение равноправных агентов, целью которых является максимизация индивидуальных, а не групповых выигрышей), «команда» (предполагается формирование между агентами вертикальных связей с целью максимизации

группового выигрыша), «иерархическая структура» (многоуровневая структура, агенты более высокого уровня имеют большую значимость), «федерация» (группа уступает часть своих прав, например, координация действий, одному агенту-делегату, члены группы взаимодействуют только с ним), «конгрегация» (в отличие от «коалиции» и «команды» предполагается создание долговременных вертикальных связей без привязки к какой-либо конкретной задаче) [2].

Решению задачи формирования и оптимизации архитектуры, а также синтеза организационной структуры МАС посвящены работы [3-6].

В работе [3] МАС рассматривается в виде набора иерархических деревьев, при этом узлы представляют агентов, ребра – связи между ними. Информационный обмен между агентами осуществляется только в вертикальном направлении.

В [4] применяется подход, подобный предыдущему. При этом в графе с помощью операции «сжатия ребер» (объединение нескольких вершин на основании наличия у каждой из них однотипной связи с одной и той же вершиной) выделяются потенциальные коалиции.

В работе [5] для генерации коалиционной структуры применяется гибридный алгоритм, основанный на «древовидном алгоритме поиска» (CFSS) и «алгоритме динамического программирования» (DuPE).

В работе [6] предложен подход, предусматривающий перераспределение задач от «дефектных» агентов (не способных в данный момент в полной мере выполнять свои обязанности) к полнофункциональным.

Общим недостатком рассмотренных решений является возможность формирования организационных структур не более двух типов (как правило, «команда», «коалиция»). Целью работы является устранение обозначенного недостатка аналогичных работ, а именно разработка архитектуры МАС

(формализованной в виде набора некоторых базовых правил [7]), позволяющей моделировать более двух типов организационных структур МАС (с возможностью автоматического изменения типа организационной структуры в процессе решения поставленной задачи).

Известен широкий спектр алгоритмов машинного обучения (биоинспирированные алгоритмы), опирающихся на различные области биологии, применяемых в т.ч. в теории многоагентных систем. Подобный подход, а именно заимствование механизмов живой природы, может быть применен и для достижения цели данной работы. В частности, для царства животных характерно множество успешно функционирующих организованных сообществ, структура которых регулируется степенью выраженности у составляющих их особей тех или иных моделей инстинктивного поведения [8]. Далее приводится набор показателей, применяемых в базовых правилах, определяющих архитектуру МАС, основанной на «зоосоциальных принципах».

Материалы и методы

Для описания МАС, основанной на «зоосоциальных принципах», предлагается использовать следующие параметры:

1) Группа параметров, моделирующих «витальные инстинкты».

а) «Пищевой инстинкт» [8] выражается в стремлении агентов к получению поощрений («пищи») за успешное выполнение поставленных задач:

$$F_{\alpha_i} = \sum_{t=t_0}^{t_N} r_T k_{hunger}(t), \quad (1)$$

где t – параметр времени, $t = t_0, t_0 + \Delta t, \dots, t_N$, t_0 – время начала функционирования МАС, Δt – некоторый временной лаг, t_N – время окончания процесса функционирования МАС, r_T – вознаграждение, полученное агентом α_i за выполнение задачи (или подзадачи) T (таким

образом, при определении величины полученной «пищи» используются принципы парадигмы обучения с подкреплением [9]), $k_{hunger}(\tau) = \frac{1}{1+e^{-\beta_{hunger}\tau}}$ – «функция пищеварения», реализующая процесс снижения вклада вознаграждений, полученных ранее, в показатель F_{α_i} , $i = \overline{1, \alpha_N}$, $\alpha_N = |A_S|$, β_{hunger} – «скорость пищеварения» – настраиваемый параметр, с увеличением значения которого график функции становится менее пологим, $\beta_{hunger} > 0$.

б) «Инстинкт экономии энергии» [8] выражается в стремлении агентов к минимизации энергетических затрат, может быть формализован через параметр $P_{rest}(c_t^{bat})$ – «желание отдыха» – вероятность перехода в режим экономии энергии, c_t^{bat} – уровень заряда аккумуляторной батареи в момент времени t , $P_{rest}(c_t^{bat}) = 1 - \frac{1}{1+e^{\beta_{fatigue}c_t^{bat}}}$, $c_t^{bat} \in [c_{t_{max}}^{bat} \rightarrow (-L), c_{t_{min}}^{bat} \rightarrow L | L \in \mathbb{N}]$, $\beta_{fatigue}$ – «скорость наступления усталости» – настраиваемый параметр, с увеличением значения которого график функции становится менее пологим, $\beta_{fatigue} > 0$. При этом под переходом в режим экономии энергии будем понимать минимизацию энергопотребления за счет снижения производительности аппаратной части агента.

в) «Защитный инстинкт» [8] может быть выражен через параметр «стремление к риску» (P_{risk} , вероятность выбора действий, приводящих к повреждению или выходу из строя агента). При этом под действиями, приводящими к повреждению или выходу из строя агента, будем понимать кортежи $\langle S_{start}, A, S_{end} \rangle$, формирующие «табу-список», где A – действие, выполнение которого привело к переходу агента из состояния S_{start} в состояние S_{end} , что повлекло повреждение агента или выход из строя.

2) Группа параметров, моделирующих «инстинкты саморазвития» [8].

а) «Исследовательский инстинкт» [8] описывается показателем P_{not_best} – «показатель любознательности» – вероятность выбора действия, выполнение которого не ведет, как показывает практика (опыт агента), к оптимальному результату (побуждает агента к верификации опыта, как собственного, так и полученного от других агентов).

б) «Подражательный инстинкт» [8]. Рассмотрим это понятие как воспроизведение опыта, полученного ранее другими агентами. Исходя из этого, определим параметр P_{exper} – «желание делиться своим опытом» – вероятность обмена агентами полученным опытом. При этом под опытом будем понимать кортежи вида:

$$\langle S_{start}, A, S_{end}, r \rangle, \quad (2)$$

где S_{start}, A, S_{end} – см. (2), r – вознаграждение, полученное агентом за выполнение перехода $S_{start} \xrightarrow{A} S_{end}$.

г) «Коммуникативный инстинкт» выражается с помощью показателя «общительности» $P_{horizontal}$ – вероятность, с которой агенты будут формировать горизонтальные связи (сигналы, обеспечивающие связность действий агентов одного уровня в рамках решения глобальной задачи).

3) Группа параметров, моделирующих «ролевые инстинкты» [8].

а) «Стадный инстинкт» [8] может быть выражен набором следующих параметров:

– P_{subor} – «желание подчиняться» – вероятность установления агентом вертикальных связей, в которых он будет являться подчиненной стороной. При этом под вертикальной связью будем понимать координирующие сигналы (направлены на нижний уровень иерархии, имеют целью назначение агентам-подчиненным задач, а также вознаграждений по результатам их выполнения, арбитраж конфликтных ситуаций), информационные сигналы обратной связи (направлены на верхний уровень иерархии, т.е. к агентам-

координаторам, содержат отчет о выполнении агентами-подчиненными поставленных задач, либо сигнал о возникновении конфликтной ситуации).

– P_{free} – «желание свободы» – вероятность разрыва агентом-подчиненным вертикальной связи.

б) «Территориальный инстинкт» [8], может выражаться в наличии запрета на сближение агентов в пространстве в пределах территории, ограниченной радиусом R_{terr} («радиус индивидуальной дистанции»). Может быть формализован с помощью пространственных радиусов, например, «публичная зона» (область с радиусом R_{public} , на которой должны располагаться агенты для формирования вертикальных связей, $R_{private} < R_{public}$), «социальная зона» (область, имеющая радиус R_{social} , на которой должны располагаться агенты для формирования горизонтальных связей, $R_{private} < R_{social}$), «личная зона» (область, непосредственно прилегающая к агенту, имеющая радиус $R_{private}$, доступ на которую потенциально опасен для целостности агента).

4) Группа параметров, позволяющих установить правила «доминирования» [8]. Отражают «авторитет» агента, на основании которого принимаются решения об установлении вертикальных связей (распределение ролей агент-координатор – «вожак стаи», агент-подчиненный – «добытчик пищи»), о разрешении конфликтных ситуаций (коллизий), порядок распределения задач.

Формализуем понятие «авторитет агента» в виде параметра

$$\varepsilon_{\alpha_i} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_N} F_{\alpha_{i_t}} k_{oblivion}(t)}{t_N}, \quad (3)$$

где $F_{\alpha_{i_t}}$ – уровень «пищи» в момент времени t (см. формулу (1)), добытой агентом α_i , $F_{\alpha_{i_t}} : k_{hunger} |_{t \in [t_0, t]}$, $k_{oblivion}$ – «коэффициент забвения»,

$$k_{oblivion} = f(t) = \frac{1}{1 + e^{-\beta_{oblivion} t}},$$

где $\beta_{oblivion}$, – «скорость забывания», t – параметр времени, $t = t_0, t_0 + \Delta t, \dots, t_N$, t_0 – время начала функционирования МАС, Δt – некоторый временной лаг, t_N – время окончания процесса функционирования МАС (в процессе функционирования МАС параметр t_N учитывается как t_{now} – текущий момент времени).

Агент-координатор также может завербовать (в качестве агента-подчиненного) другого агента-координатора (при сохранении за ним имеющихся вертикальных связей с агентами-подчиненными). Такого агента-координатора будем называть «агент-координатор k -го уровня иерархии», причем значение k определяется следующим образом:

$$k = |v_{to\ subordinates}| + 1,$$

где $v_{to\ subordinates}$ – число уровней, отделяющих агента-координатора k -го уровня иерархии от «простого агента-подчиненного» (агент, не имеющий вертикальных связей, в которых он занимает доминирующее положение).

Соответственно, рассмотренный принцип иерархии может быть распространен на «авторитет» агента: «авторитет» агента-координатора 1-го уровня иерархии, «авторитет» агента-координатора 2-го уровня иерархии и т.д.

При этом потенциальный агент-координатор k -го уровня должен удовлетворять следующему критерию: «авторитет» агента не должен опускаться ниже заданного порогового значения на некотором интервале времени:

$$\forall t: \varepsilon_{\alpha_i t} > \varphi_k, \quad (6)$$

где $t \in [t_0, t_1 = t_0 + \Delta t, \dots, t_N]$, t_0 – время начала функционирования МАС, t_N – время окончания функционирования МАС, Δt – лаг, с которым выполняется фиксация показателя времени, φ – пороговое значение, ниже которого не должен опускаться уровень «авторитета» агента α_i (простой

агент-подчиненный или свободный агент), φ_k – пороговое значение, ниже которого не должен опускаться уровень «авторитета» агента α_i (это может быть простой агент-подчиненный, претендующий на роль агента-координатора 1-го уровня, либо агент-координатор k -го уровня, претендующий на роль агента-координатора $(k+1)$ -го уровня иерархии).

Процесс первоначального получения роли агента-координатора и восхождения по уровням иерархии (для 1-го и 2-го уровней иерархии) может быть описан следующим образом:

1) Свободный агент α_i^{free} при выполнении условия (6) становится потенциальным агентом-координатором 1-го уровня.

2) В публичной зоне агента α_i^{free} находится другой свободный агент α_j^{free} , с которым может быть установлена вертикальная связь с доминированием агента α_i^{free} , $i = \overline{1, |A_S|}$, $j = \overline{1, |A_S|}$, A_S – множество агентов МАС. Агент α_j^{free} заносится во множество $A_{\alpha_i^{free}}$ (множество потенциальных агентов-подчиненных α_i^{free}).

3) Если $|A_{\alpha_i^{free}}| \geq \vartheta_1$, то все агенты $\alpha_j^{free} \in A_{\alpha_i^{free}}$ становятся агентами-подчиненными α_i^{free} , следовательно, α_i^{free} становится агентом-координатором 1-го уровня иерархии α_i^{coord} , множество $A_{\alpha_i^{free}}$ преобразуется во множество агентов-подчиненных $A_{\alpha_i^{coord}}$, ϑ_1 – минимальное число потенциальных агентов-подчиненных, находящихся в публичной зоне агента α_i^{free} , необходимое для назначения ему роли агента-координатора 1-го уровня иерархии.

4) Если для α_i^{coord} (агент-координатор уровня $k-1$) выполняется условие (6) и $|A_{\alpha_i^{coord}}^k| \geq \vartheta_k$, то α_i^{coord} становится агентом-координатором k -го уровня иерархии с множеством агентов-подчинённых $A_{\alpha_i^{coord}}^k$.

Результаты

Разработанная модель представления архитектуры МАС позволяет моделировать следующие типы организационных структур (далее указан минимальный набор показателей, необходимых для моделирования той или иной организационной структуры):

1) «Коалиция» при $P_{horizontal} > 0$ (вероятность формирования горизонтальных связей), $P_{subor} = 0$ (вероятность установления агентом вертикальных связей, в которых он будет являться подчиненной стороной), $R_{terr} < R_{social}$ (радиус индивидуальной дистанции между агентами должен быть меньше радиуса «социальной зоны»).

2) «Команда» при $P_{subor} > 0$, $P_{free} < 1$ (вероятность разрыва подчиненным агентом вертикальной связи), $R_{terr} < R_{public}$ (радиус индивидуальной дистанции между агентами должен быть меньше радиуса «публичной зоны»), $\varphi_k \rightarrow \infty$ и $\vartheta_k \rightarrow \infty$ при $k \neq 1$ (запрет на формирование нескольких уровней иерархии, т.е. в «команде» будут представлены только агенты-координаторы 1-го уровня иерархии).

3) «Иерархическая структура»: $P_{subor} > 0$, $P_{free} < 1$, $R_{terr} < R_{public}$, $\varphi_k < \varphi_{max}$ и $\vartheta_k < \vartheta_{max}$, где φ_{max} – максимально значение показателя «престижа», достижимое для агентов, ϑ_{max} – максимально возможное число агентов в группе, $k = \overline{1, N}$, N – максимально достижимое число уровней иерархии.

4) «Федерация»: $P_{horizontal} = 0, R_{terr} = R_{social}$ (запрет горизонтальных связей), $P_{subor} > 0, P_{free} < 1, R_{terr} < R_{public}$.

5) «Конгрегация»: $P_{subor} > 0, P_{free} < 1, R_{terr} < R_{public}, \varphi_k < \varphi_{max}$ и $\vartheta_k < \vartheta_{max}, P_{free} = 0$ (сформированные вертикальные связи являются постоянными).

При этом переход от одной организационной структуры к другой может быть выполнен путем изменения значений соответствующих показателей.

Обсуждение

Для определения оптимальной архитектуры МАС возможно применение «генетического алгоритма» [10]. При этом «хромосома» будет включать множество перечисленных выше параметров, где каждый из них будет представлять собой отдельный «ген». При выполнении оператора «мутации» новое значение гена будет определяться случайным образом (в пределах области допустимых значений соответствующего параметра).

Выводы

Предложен «зоосоциальный метод автоматической адаптации организационной структуры МАС», предусматривающий реализацию множества правил поведения агентов и функционирования МАС в соответствии с принципами, характерными для социальных животных, при этом для определения оптимальных параметров МАС может быть применен генетический алгоритм. Главным отличием предложенного метода от аналогов являются возможность представления следующих типов организационных структур, путем подбора различных комбинаций предложенных параметров МАС: «коалиция», «команда», «иерархическая структура», «федерация», «конгрегация».

Литература

1. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 352 с.
2. Horling B., Lesser V. A Survey of Multi-Agent Organizational Paradigms // The Knowledge Engineering Review. 2005. № 19(04). Pp. 281 – 316.
3. Ling Yu, Zhiqi Shen, Chunyan Miao, Lesser V. Genetic Algorithm Aided Optimization of Hierarchical Multi-Agent System Organization // The Tenth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Taipei. 2011. URL: researchgate.net/publication/221456103_Genetic_algorithm_aided_optimization_of_hierarchical_multiagent_system_organization
4. Bistaffa F., Farinelli F., Cerquides J., Rodríguez-Aguilar J., Ramchurn S.D. Anytime Coalition Structure Generation on Synergy Graphs // 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2014. URL: researchgate.net/publication/269092245_Anytime_coalition_structure_generation_on_synergy_graphs
5. Rahwan T., Michalak T.P. Coalition Structure Generation on Graphs // Artificial Intelligence. 2014. URL: researchgate.net/publication/267396027_Coalition_Structure_Generation_on_Graphs
6. Ghrieb N., Mokhati F., Tahar G. Maintaining Organizational Multi-agent Systems: A Reorganization-based Preventive Approach // 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. 2021. URL: researchgate.net/publication/349209965_Maintaining_Organizational_Multi-agent_Systems_A_Reorganization-based_Preventive_Approach

7. Дубенко Ю.В., Дышкант Е.Е., Демидов В.А. Метод автоматической адаптации архитектуры многоагентной системы, основанный на модификации множества базовых правил ее организации // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2025. №1. С. 90-108.

8. Лысов В.Ф., Костина Т.Е., Максимов В.И. Этология животных / Под. ред. проф. В.И. Максимова. М.: КолосС, 2010. 296 с.

9. Саттон, Р. С. Обучение с подкреплением: введение: практическое руководство; перевод с английского А. А. Слинкина. 2-е издание. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.

10. Дэн Саймон Алгоритмы эволюционной оптимизации; пер. с англ. А. В. Логунова. М.: ДМК Пресс, 2020. 1002 с.

References

1. Tarasov V.B. Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nykh organizatsiyam: filosofiya, psikhologiya, informatika [From Multi-Agent Systems to Intelligent Organizations: Philosophy, Psychology, Computer Science]. M.: Editorial URSS, 2002. 352 p.

2. Horling B., Lesser V. A The Knowledge Engineering Review. 2005. № 19(04). Pp. 281 – 316.

3. Ling Yu, Zhiqi Shen, Chunyan Miao, Lesser V. The Tenth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Taipei. 2011. URL: researchgate.net/publication/221456103_Genetic_algorithm_aided_optimization_of_hierarchical_multiagent_system_organization

4. Bistaffa F., Farinelli F., Cerquides J., Rodríguez-Aguilar J., Ramchurn S.D. 2014 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems. 2014. URL: researchgate.net/publication/269092245_Anytime_coalition_structure_generation_on_synergy_graphs

5. Rahwan T., Michalak T.P. Artificial Intelligence. 2014. URL: researchgate.net/publication/267396027_Coalition_Structure_Generation_on_Graphs
6. Ghrieb N., Mokhati F., Tahar G. 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence. 2021. URL: researchgate.net/publication/349209965_Maintaining_Organizational_Multi-agent_Systems_A_Reorganization-based_Preventive_Approach
7. Dubenko YU.V., Dyshkant E.E., Demidov V.A. Elektronnyj setevoy politematicheskiy zhurnal «Nauchnyye trudy KubGTU». 2025. №1. pp. 90-108.
8. Lysov V.F., Kostina T.E., Maksimov V.I. Etologiya zhivotnykh [Animal Ethology]. Pod. red. prof. V.I. Maksimova. M.: KolosS, 2010. 296 p.
9. Sutton, R. S. Obucheniye s podkrepleniym: vvedeniye: prakticheskoye rukovodstvo [Reinforcement Learning: An Introduction: A Practical Guide]; perevod s angliyskogo A. A. Slinkina. 2–e izdaniye. M.: DMK Press, 2020. 552 p.
10. Den Saymon Algoritmy evolyutsionnoy optimizatsii [Evolutionary Optimization Algorithms]; per. s angl. A. V. Logunova. M.: DMK Press, 2020. 1002 p.

Дата поступления: 6.05.2025

Дата публикации: 25.06.2025