

Научная статья

УДК 004.89 : 656.078

DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.67.1.021>**Мультиагентная модель управления морской киберфизической системой**Искандеров Ю.М.¹ iskanderov.y@iias.spb.su¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН)

Аннотация. В статье представлен подход, направленный на совершенствование процессов управления морскими киберфизическими системами. Эффективным средством реализации указанного подхода является построение защищенных мультиагентных инфраструктур, обеспечивающих процессы управления подобными системами. Отмечены характерные свойства мультиагентных систем. Для решения задач управления морской киберфизической системой даны представления модели класса интеллектуальных программных агентов, а также главного программного агента. Выделены основные классы задач управления морской киберфизической системой и дано их сущностное описание. Особо отмечена значимость задачи организации безопасного расхождения судов в соответствии с международными и местными правилами. Поскольку ключевым элементом интеллектуальной системы управления является база знаний, дано представление о ее структуре, необходимой для управления морской киберфизической системой. Показано, что процесс решения задач управления имеет определенную структуру, характер которой зависит от функционирования системы управления морской киберфизической системой, поэтому для каждой функциональной задачи в мультиагентной системе присваиваются интеллектуальные программные агенты, которые реализуют информационный обмен между собой. Исходя из этого, представлена мультиагентная инфраструктура системы управления морской киберфизической системой, ключевыми элементами которой, или главными агентами, являются координатор интеллектуальных программных агентов, менеджер онтологий и коммуникатор интеллектуальных программных агентов. Отмечены возможности применения и перспективность предложенного подхода, а также направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: мультиагентная модель, управление, морская киберфизическая система, интеллектуальная система, интеллектуальный программный агент, мультиагентная инфраструктура, база знаний, онтология

Для цитирования: Искандеров Ю.М. Мультиагентная модель управления морской киберфизической системой. Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 1 часть 1, С. 169—174. DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.021.

*Original article*DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2025.67.1.021>**Multi-agent model for control of a Maritime Cyber-Physical System**Yury M. Iskanderov¹ iskanderov.y@iias.spb.su¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS)

Abstract. The article presents an approach aimed at improving the control processes of maritime cyber-physical systems. An effective means of implementing this approach is the construction of secure multi-agent infrastructures that provide management processes for such systems. The characteristic properties of multi-agent systems are noted. To solve the problems of controlling a maritime cyber-physical system, representations of a model of a class of intellectualsoftware agents, as well as the main software agent, are given. The main classes of tasks of control of a maritime cyber-physical system are identified and their essential description is given. The importance of the task of organizing the safe passage of these ships in accordance with international and local rules is especially noted. Since the key element of the intellectualcontrol system is the knowledge base, an idea of its structure necessary for controlling the maritime cyber-physical system is given. It is shown that the process of solving control problems has a certain structure, the nature of which depends on the functioning of the control system of the maritime cyber-physical system, therefore, for each functional task in the multi-agent system, intellectualsoftware agents are assigned that implement information exchange between themselves. Based on this, a multi-agent infrastructure of the control system of a maritime cyber-physical system is presented, the key elements of which, or main agents, are the coordinator of intellectualsoftware agents, the ontology manager and the communicator of intellectualsoftware agents. The possibilities of application and the prospects of the proposed approach, as well as the directions for further research, are noted.

Keywords: multi-agent model, control, autonomous maritime surface ship, intellectualsystem, intellectualsoftware agent, multi-agent infrastructure, knowledge base, ontology

For citation: Yury M. Iskanderov, Multi-agent model for control of a Maritime Cyber-Physical System, Marine intellectual technologies. 2025. № 1 part 1, P. 169—174. DOI: 10.37220/MIT.2025.67.1.021.

Введение

Развитие новых информационных технологий стремительно меняет облик различных предметных областей, особенно тех, в которых накоплен

значительный опыт по разработке и созданию автоматизированных систем управления. Несомненно, к таким предметным областям относятся области судостроения и судоходства. В настоящее время уровень насыщения различными

техническими средствами и средствами инфотелекоммуникаций морского транспорта позволяет использовать для исследования, анализа и оценки процессов управления концепцию киберфизических систем, по оценкам специалистов, позволяющих самым серьезным образом повлиять на повышение уровня безопасности мореплавания.

Очевидным является факт, что управление морскими киберфизическими системами (МКФС) можно осуществлять только на основе современных средств автоматизации, сетевых технологий инфотелекоммуникаций с применением достижений искусственного интеллекта (ИИ).

Мультиагентный подход к управлению МКФС

Ключевыми проблемами при управлении МКФС являются адекватная оценка текущей ситуации, характеризующейся как показателями состояния и положения самой МКФС, так и показателями внешней среды, а также обоснованный прогноз развития текущей ситуации. Для того чтобы МКФС могла выполнять комплекс своих функциональных задач, она должна иметь релевантную систему управления (СУ). В частности, должно быть четкое представление о структуре СУ и ее элементов.

Создание подобной СУ является нетривиальной проблемой, поскольку необходимо учитывать значительное количество факторов, обладающих высокой степенью неопределенности. Для решения этой проблемы необходимо использовать подход, основанный на применении интеллектуальной системы (ИС) [1-4]. Так как база знаний (БЗ) является ключевым элементом ИС, то от высокого качества ее построения, в том числе от ее безопасности, зависит эффективность функционирования СУ МКФС в целом.

Эффективным средством реализации указанного подхода является построение защищенных мультиагентных инфраструктур, обеспечивающих адаптацию инструментальных средств и СУ к изменяющимся условиям функционирования МКФС. Основопологающей характеристикой мультиагентных систем (МАС) является мобильность. В конечном итоге защищенные мобильные информационные системы обладают способностью функционировать в гетерогенном окружении, эволюционно развиваться и адаптироваться к окружающей обстановке и изменениям в структуре и составе объекта управления [5-11].

МАС обладает следующими свойствами:

- структура сообщества агентов является динамической относительно типов и количества членов сообщества;
- сообщество агентов основывается на принципах кооперации;
- структура сообщества агентов подразумевает распределенность, что позволяет эффективно организовать доступ к различным источникам данных;
- агенты используют определенную предметную область для решения поставленных задач;
- агенты обеспечивают работу в асинхронном режиме;
- появление новых членов сообщества агентов или изменение функций некоторых агентов не

требует перезагрузки всей информационной системы.

Для решения задач управления МКФС модель класса интеллектуальных программных агентов (ИПА) IA может быть представлена совокупностью следующих элементов:

$$IA = \langle LA, CM, BM, O, AD, SA \rangle, \quad (1)$$

где

LA - множество информационных атрибутов (идентификатор, имя, местоположение и т.д.);

CM - коммуникационная модель (язык и методы для общения);

BM - поведенческая модель (способы обработки сообщений);

O - множество онтологий;

AD - множество дополнительных функций, необходимых для выполнения поставленных задач и/или формирования ответных сообщений;

SA - множество внутренних структур агента, описывающих его функциональное устройство, в зависимости от его основного назначения.

Множество внутренних структур агента SA включает в себя:

$$SA = \langle \{SA_i\}, i=1, N \rangle, \quad (2)$$

где

SA_i - внутренняя структура агента, характеризующая i-ую роль в соответствии с назначением.

Модель главного интеллектуального агента в МАС можно представить в виде:

$$HIA = \langle LA, CM, BM, O, AD, SA_{head} \rangle, \quad (3)$$

где

$$SA_{head} = \langle TP, TA, TV, FP \rangle, \quad (4)$$

TP - множество целей агента;

TA - множество действий, допустимых для агента;

TV - множество вариантов декомпозиции задач (библиотека частичных планов);

FP - функция формирования плана действий агента (формирует упорядоченную последовательность действий агента из множества его допустимых действий), исходя из его текущей цели и варианта декомпозиции задачи.

Мультиагентная модель управления МКФС

На основе предложенного подхода рассмотрим мультиагентную модель управления МКФС.

При управлении МКФС, независимо от того каким образом реализуется управление, можно выделить следующие основные классы задач (рис.1).



Рис.1. Основные классы задач при управлении МКФС.

1. Управление решением функциональных задач МКФС

В зависимости от функциональных задач, которые будут возложены на МКФС, необходимо разработать соответствующие БЗБЗ, а также процедуры их взаимодействия.

2. Управление информационным обменом (коммуникациями)

Этот класс задач зависит от характера (способа) управления МКФС, следовательно, необходимо обеспечить или непрерывный информационный обмен, или разработать специальный режим передачи и приема информации, также можно использовать различные комбинации возможностей первых двух вариантов.

3. Управление движением МКФС

Управление движением МКФС является важнейшим классом задач управления, от решения которых зависит эффективность использования МКФС. К этим задачам, в первую очередь, относятся:

- управление движением МКФС с грузом или без него;
- управление устойчивостью движения;
- управление направлением движения;
- управление скоростью движения;
- управление движением в группе;
- оценка безопасности зон движения.

4. Управление состоянием самой МКФС

Поскольку МКФС является сложной технической системой, то этот класс задач управления также является очень важным. Обеспечение целенаправленности, работоспособности, надежности МКФС является обязательным условием выполнения поставленных функциональных задач.

5. Управление состоянием БЗ СУ МКФС

Качество состояния БЗ СУ определяет эффективность управления МКФС в целом. В связи с этим, состояние БЗ должно быть постоянно актуальным, адекватным. Требования к таким БЗ представлены в [12,13].

Следует отметить, что в комплексе вопросов, связанных с обеспечением функционирования МКФС, особую значимость имеет задача организации безопасного расхождения судов при управлении движением в соответствии с международными и местными правилами. Это связано с требованием, чтобы действия были предсказуемы и прозрачны для экипажей судов. Поэтому важнейшим фактором становится необходимость знания при расхождении намерений встречного судна. Именно знание о том, как встречное судно намеревается маневрировать, обеспечивает корректную интерпретацию правил расхождения судов [14].

Использование МАС позволяет реализовать релевантный инструментальный для обмена информацией о планируемых маршрутах между судами и выбора подходящего маневра и оценить намерения судов заблаговременно [15,16]. Например, если все суда будут транслировать данные о своем положении, параметрах движения и планируемом маршруте посредством

автоматизированной идентификационной системы, в общую виртуальную БЗ, то на каждом судне в нужный момент времени можно будет принять решение о маневрировании (или о сохранении курса и скорости), приемлемое для всей группы судов, участвующих в расхождении. Такой вариант управления групповым движением судов является принципиально новым решением, позволяющим создать систему безопасности расхождений, универсальную и приемлемую для всех судов, независимо от степени их автоматизации [15,16].

Как было отмечено выше, ключевым элементом интеллектуальной системы управления является БЗ. На рис.2 представлена структура БЗ, необходимой для управления МКФС.



Рис.2. База знаний системы управления МКФС.

Знания, необходимые для формирования БЗ СУ МКФС могут быть получены на основе применения технологии, разработанной в [12].

Очевидно, что процесс решения задач управления МКФС имеет определенную структуру, характер которой зависит от функционирования СУ. Поэтому для каждой функциональной задачи в МАС присваиваются ИПА, которые реализуют информационный обмен между собой. На рис.3 представлена мультиагентная инфраструктура СУ МКФС. Ключевыми элементами СУ, или главными агентами, являются координатор ИПА, менеджер онтологий и коммуникатор ИПА.

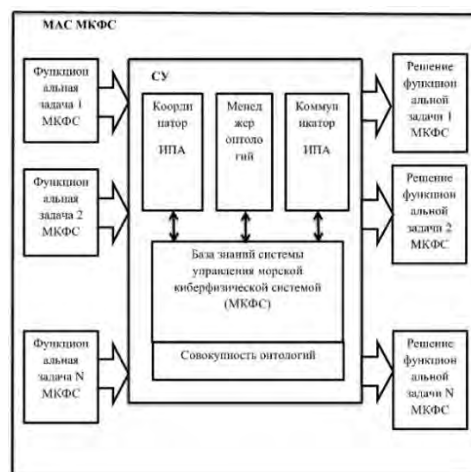


Рис.3. Мультиагентная инфраструктура системы управления МКФС.

Функционирование этих главных агентов и их взаимодействие при реализации алгоритмов ИПА будут характеризовать качество и эффективность СУ, и МАС МКФС в целом. С помощью главных агентов СУ, агенты обращаются к самой базе знаний, где отыскивают необходимую онтологию. Знания, предписания и правила, хранящиеся в онтологии, позволяют ИПА принять правильное решение. Координатор ИПА обеспечивает общение агентов, что позволяет, без возникновения конфликтов из-за приоритета ситуации, учесть все влияния внешних и внутренних факторов для принятия оптимального решения. Несомненно, МАС также поможет и в нестандартных ситуациях. Постоянная поддержка актуальности БЗ и удобное «общение» с агентами поможет обеспечить принятие лучшего решения.

Заключение

Развитие новых информационных технологий позволяет совершить качественный скачок в области создания СУ транспортных систем различного назначения. Применение принципа действия мультиагентных управляющих систем позволяет выполнить декомпозицию сложнейшей задачи управления МКФС на множество локальных задач,

возлагаемых на агентов, распределение этих задач между агентами, планирование коллективного поведения агентов, координацию взаимодействия агентов на основе кооперации, реконфигурации, коммуникации и разрешения конфликтных ситуаций, а также использовать онтологии – специализированные БЗ о предметной области в работе агентов.

Формирование предложенной мультиагентной модели СУ МКФС позволит значительно уменьшить затраты на сетевое взаимодействие, сократить время решения задач, обеспечить простоту и удобство использования системы за счет автономности, мобильности и интеллектуальности программных агентов, что показывает перспективность использованного подхода. Дальнейшие исследования необходимо направить на формирование БЗ СУ МКФС, реализующей эффективное взаимодействие главных агентов, т.е. координатора ПА, менеджера онтологий и коммуникатора ПА, а также на разработку агентных платформ, обеспечивающих решение функциональных задач, которые могут быть возложены на МКФС.

Литература

1. Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития // Информационные технологии. – 2013. – с1. – с. 1–32.
2. Искандеров Ю.М. Интеллектуальная поддержка принятия решений в логистических системах / Ю. М. Искандеров, А. С. Свистунова, Д. С. Хасанов, А. С. Чумак // Морские интеллектуальные технологии. – 2021. – № 2-1(52). – С. 145-153. – DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.021. – EDN OSVSZB.
3. Искандеров Ю.М., Ершов А.А. Об интеллектуальном проектировании АСУ для транспортно-логистических систем. В сборнике: Логистика: современные тенденции развития. Материалы XVII Международной научно-практической конференции. 2018. С. 203-206.
4. Iskanderov, Y. Security of information processes in supply chains / Y. Iskanderov, M. Pautov // Advances in Intellectual Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 13-22. – DOI 10.1007/978-3-030-01821-4_2. – EDN WTVSRZ.
5. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems // John Wiley & Sons. 2009. 368 p.
6. Leitao P., Vrba P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. 2011. LNCS 6867. pp. 15–28.
7. Скобелев П. О. и др. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени // Механика, управление и информатика. – 2011. - № 5. – с. 110–122.
8. Городецкий В. И., & Скобелев П. О. (2017). Многоагентные технологии для промышленных приложений: реальность и перспектива. Труды СПИИРАН, 6(55), 11-45. <https://doi.org/10.15622/sp.55.1>
9. Искандеров, Ю. М. Применение интеллектуальных агентов при моделировании интегрированной информационной системы транспортной логистики / Ю. М. Искандеров // Информатизация и связь. – 2020. – № 5. – С. 59-66. – DOI 10.34219/2078-8320-2020-11-5-59-66. – EDN FQHZMN.
10. Искандеров Ю.М. Построение моделей интегрированной информационной системы транспортной логистики на основе мультиагентных технологий. В сборнике: "НОВАЯ ЭКОНОМИКА" И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ЕЕ ФОРМИРОВАНИЯ. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Под общ. ред. А.В. Яковлевой. 2016. С. 62-69.
11. Искандеров Ю.М. Мультиагентные системы для управления логистическими функциями в цепях поставок. В сборнике: Логистика: современные тенденции развития. Материалы XVIII Международной научно-практической конференции. 2019. С. 219-221.
12. Искандеров Ю.М. Технология создания базы знаний для автоматизированной системы управления корпоративной сетью связи морского порта. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. Санкт-Петербург, 2005.
13. Искандеров Ю.М. Особенности информатизации транспортно-технологических процессов в цепях поставок. Информатизация и связь. 2019. № 4. С. 31-37.
14. Международные правила предупреждения столкновений судов в море, 1972 г. (МППСС-72). 5-е изд., испр. М: МОРКНИГА, 2013. 156 с., 142 ил. https://www.morkniga.ru/files/shipowner/1597931010_COLREG72.pdf
15. Искандеров, Ю. М. Мультиагентная модель интегрированной системы управления судном / Ю. М. Искандеров, В. Д. Гаскаров, В. И. Дорошенко // Вестник государственного университета морского и речного

- флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 831-841. – DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841. – EDN HHUFYA.
16. Смоленцев, С. В. Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, Ю. М. Искандеров // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 687-695. – DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695. – EDN YLQZCP.

References

1. Skobelev P. O. Intellectual resource management systems in real time: development principles, experience of industrial implementation and development prospects // Information technologies. -2013. - s1. - p. 1–32.
2. Iskanderov Y. Intellectual support for decision-making in logistics systems / Yu. M. Iskanderov, A. S. Svistunova, D. S. Khasanov, A. S. Chumak // Marine intellectual technologies. - 2021. - No. 2-1 (52). - P. 145-153. – DOI 10.37220/MIT.2021.52.2.021. – EDN OSVSZB.
3. Iskanderov Yu.M., Ershov A.A. On intellectual design of automated control systems for transport and logistics systems. In the collection: Logistics: modern development trends. Proceedings of the XVII International scientific and practical conference. 2018. P. 203-206.
4. Iskanderov, Y. Security of information processes in supply chains / Y. Iskanderov, M. Pautov // Advances in Intellectual Systems and Computing. – 2019. – Vol. 875. – P. 13-22. – DOI 10.1007/978-3-030-01821-4_2. – EDN WTVSRZ.
5. Wooldridge M. An Introduction to Multi-Agent Systems // John Wiley & Sons. 2009. 368 p.
6. Leitao P., Vrba P. Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents // Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. 2011. LNCS 6867. pp. 15–28.
7. Skobelev P. O. et al. Multi-agent technologies for managing the distribution of production resources in real time// Mechanics, Control and Informatics. - 2011. - No. 5. - pp. 110-122.
8. Gorodetsky V. I., & Skobelev P. O. (2017). Multi-agent technologies for industrial applications: reality and prospects. Proceedings of SPIIRAS, 6(55), 11-45. <https://doi.org/10.15622/sp.55.1>
9. Iskanderov, Yu. M. Application of intellectual agents in modeling an integrated information system of transport logistics / Yu. M. Iskander // Informatization and communication. - 2020. - No. 5. - pp. 59-66. – DOI 10.34219/2078-8320-2020-11-5-59-66. – EDN FQHZMN.
10. Iskanderov Yu. M. Construction of models of an integrated information system of transport logistics based on multi-agent technologies. In the collection: "NEW ECONOMY" AND THE MAIN DIRECTIONS OF ITS FORMATION. Collection of articles from the International scientific and practical conference. Under the general editorship of A. V. Yakovleva. 2016. Pp. 62-69.
11. Iskanderov Yu. M. Multi-agent systems for managing logistics functions in supply chains. In the collection: Logistics: modern development trends. Proceedings of the XVIII International scientific and practical conference. 2019. Pp. 219-221.
12. Iskanderov Yu. M. Technology of creating a knowledge base for an automated management system of a seaport corporate communication network. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Admiral S.O. Makarov State University of Maritime and Inland Shipping. St. Petersburg, 2005.
13. Iskanderov Yu.M. Features of informatization of transport and technological processes in supply chains. Informatization and communication. 2019. No. 4. P. 31-37.
14. International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (IRPCS-72). 5th ed., corr. M: MORKNIGA, 2013. 156 p., 142 ill. https://www.morkniga.ru/files/shipowner/1597931010_COLREG72.pdf
15. Iskanderov, Yu. M. Multi-agent model of an integrated ship control system / Yu. M. Iskanderov, V. D. Gaskarov, V. I. Doroshenko // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and River Fleet. - 2019. - Vol. 11, No. 5. - P. 831-841. - DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-5-831-841. - EDN HHUFYA.
16. Smolentsev, S. V. Cooperative maneuvering of unmanned ships for safe passage at sea / S. V. Smolentsev, A. E. Sazonov, Yu. M. Iskanderov // Bulletin of the Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and River Fleet. - 2018. - Vol. 10, No. 4. - Pp. 687-695. - DOI 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695. - EDN YLQZCP.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Искандеров Юрий Марсович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник – руководитель лаборатории интеллектуальных систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 199178, Санкт-Петербург, 14 линия В.О., 39, e-mail: iskanderov.y@iias.spb.su

Yury M. Iskanderov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher – Head of the Intellectual Systems Laboratory, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14th line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: iskanderov.y@iias.spb.su

Статья поступила в редакцию / the article was submitted 04.12.2024.

Одобрена после рецензирования / approved after reviewing 10.01.2025.

Принята к публикации / accepted for publication 20.01.2025.