

Раздел 2 СУДОВОЖДЕНИЕ, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 629.5.072

DOI: 10.34046/aumsuomt96/8

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СУДОВОЖДЕНИЯ

В. В. Астреин, доктор технических наук

С. И. Кондратьев, доктор технических наук

А.Л. Боран-Кешишьян, кандидат технических наук

В данной статье рассматривается подход разработки судовой Распределенной автоматизированной системы управления безопасностью судоходства к решению проблемы обеспечения глобальной безопасности судоходства при плавании судна в сложных условиях в некотором распределенном географическом пространстве.

Ключевые слова: безопасность, распределенность в принятии решений, МППСС-72, функциональность, коллективное взаимодействие судов, критерий расхождения судов на заданное расстояние, многошаговая стратегия, целевой кластер, оптимальное поведение

This article discusses an approach to the development of a ship's Distributed Automated Navigation Safety Management System to solving the problem of ensuring global navigation safety when a ship navigates in difficult conditions in a certain distributed geographical space.

Keywords: safety, distribution in decision-making, COLREG-72, functionality, collective interaction of ships, criterion of divergence of ships at a given distance, multi-step strategy, target cluster, optimal behavior

Принятие решений – каждодневная деятельность судоводителя, часть его повседневной жизни. Простые, привычные решения судоводитель принимает легко, часто автоматически, не очень задумываясь. В сложных и ответственных случаях он обращается к опытным капитанам, лоцманам, службам на берегу за подтверждением своего решения, за советом: каким могло бы быть другое решение. Такие обращения — это процесс поддержки принятия решения. Принятие решения в большинстве случаев заключается в генерации возможных альтернатив решений, их оценке и выборе лучшей альтернативы. При выборе альтернатив судоводителю приходится учитывать большое число противоречивых требований и, следовательно, оценивать варианты решений по многим критериям. Противоречивость требований, неоднозначность оценки ситуаций, ошибки в выборе приоритетов сильно осложняют принятие решений.

Большое количество задач, если не большинство, являются **многокритериальными задачами** [4], в которых приходится учитывать большое число факторов. В этих задачах судоводителю приходится оценивать множество факторов и последствий, характеризующих варианты решений. Например, при принятии решения для предупреждения столкновений судов необходимо

учитывать не только геометрические параметры сближения судов, но и параметры многочисленных внутренних подсистем судна, а также правовые, экологические, экономические и др. факторы.

Следует отметить, что обязанности принятия решений по управлению судном, как и ответственность за их последствия, на текущий момент и в ближайшем будущем будут возложены на судоводителя, а интеллектуальные системы будут исполнять роль **Средств поддержки принятия таких решений (СППР)**.

Решение целого ряда вышеизложенных проблем возможно на основе разработки альтернативной проблеморазрешающей системы поддержки принятия решений [9, 10, 11] – **Распределенной автоматизированной системы управления безопасностью судоходства (РАСУБС)** предназначенной для автоматического получения, анализа, обработки информации и представления решения судоводителю, связанной множеством системнообразующих отношений с объединением устройств управления информационными каналами в информационно-вычислительную сеть.

РАСУБС становится средством информационной поддержки и выработки решений, однако не освобождающей капитана и вахтенных

помощников от обязанностей постоянного контроля за навигационной обстановкой, а также от ответственности за принятые решения по управлению судном. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость определения концептуальных основ создания РАСУБС, а также принципов построения и функционирования.

Потребность во внедрении РАСУБС возникает в связи с необходимостью обеспечения контроля над изменением параметров опасного сближения дистанционно удаленных судов с целью анализа, обработки и представления решения лицу, принимающему решение (ЛПР). При этом возникают, как минимум, три сложности. Во-первых, для определения эффективности того или иного решения безопасности судовождения необходимо иметь модель поведения судна в зависимости от обстоятельств и условий плавания. Во-вторых, все участники обладают свойством активности (то есть способностью самостоятельно принимать решения – выбирать состояния, сообщать информацию и т.д., в соответствии с собственными интересами [3]), следовательно, и модель судна, и процедуры взаимодействия с ЛПР, должны учитывать эту активность. В-третьих, система принятия решений, помимо распределенности, может характеризоваться сложной многоуровневой структурой. Другими словами, имеют место как «горизонтальная» распределенность в принятии решений, так и «вертикальная» распределенность (характеризуемая наличием нескольких уровней иерархии, на которых находятся принимающие решения суда).

База знаний РАСУБС должна содержать и накапливать информацию по трем направлениям: декларативная информация, которая регламентирует законодательную базу управления процессами расхождения судов МППСС-72 [7], экспертная информация – формализованные знания экспертов в предметной отрасли – опытных судоводителей, и база прецедентов [1] – информация относительно развития событий в навигационных ситуациях, которые уже имели место в прошлом.

РАСУБС должна строиться на **принципах траекторно-целевого моделирования движения судов**, имеющих целенаправленное поведение по избежанию столкновения и выполнению требований МППСС-72. Решение этой задачи в РАСУБС может быть реализовано с использованием принципов траекторно-целевого подхода к прогнозированию движения судов в рамках кооперативного управления интеллектуальными логико-динамическими объектами. Сущность **траекторно-целевого подхода** состоит в формирова-

нии РАСУБС предполагаемых траекторий движения судов исходя из заданных целевых позиций, а также критериев и зон безопасности движения. Каждое судно представляется в виде взаимодействующего логико-динамического объекта, обладающего целенаправленным поведением и реализующего траекторию своего движения исходя из принципов безопасности в условиях выполнения требований МППСС-72.

Применяемые в РАСУБС **формальные модели** [4] должны отвечать требованиям адекватности, неизбыточности и технической осуществимости – перспективным является сочетание моделей, базирующихся на принципах искусственного интеллекта с математическими моделями, описывающими процессы движения судов.

Формы отображения информации в РАСУБС должны обеспечивать ее быстрое восприятие и высокий уровень осознания судоводителем, потому при визуализации навигационных ситуаций является целесообразным применение методов когнитивной графики.

Необходимо обеспечить возможность **информационного взаимодействия** между береговыми Системами управления движением судов (СУДС) и РАСУБС, что обуславливает необходимость разработки унифицированных протоколов обмена информацией в таких системах.

Высокой степени организации РАСУБС, наличию в ней иерархической структуры соответствует и большой удельный вес затрат, связанных с **обработкой информационных потоков**, обеспечивающих целенаправленное поведение системы, что вызывает необходимость широкого использования средств вычислительной техники и формальных методов принятия решений для предупреждения столкновения судов

Отличительной особенностью РАСУБС, является **специализация отдельных функций**, выполняемых отдельными активными элементами. Задача одних элементов – получить множество сигналов об окружающей среде, других – из совокупности всех сигналов распознать опасность столкновения, третьих – предвычислить прогноз расхождения судов, четвертых – осуществить расхождение на безопасном расстоянии. Каждый вид задач решается специализированными элементами. Специализация приводит к образованию «целевых» и «функциональных» органов управления. Задачи целевых элементов отражают назначение РАСУБС. Деятельность функциональных элементов направлена на обеспечение рекомендациями целевых элементов, которые определяют, как расхождение судов может быть

выполнено лучшим образом. РАСУБС характеризуются не только большим числом элементов и сложной структурой, но и более высоким уровнем организации.

Функционирование РАСУБС осуществляется в режиме реального времени, что требует ее интеграции с имеющимися на судне средствами контроля движения и навигационной ситуации. **Процесс функционирования** РАСУБС в таком случае предполагает циклическое решение следующей последовательности задач [9]:

- идентификация судов, находящихся в зоне возможного столкновения;
- мониторинг параметров движения судов и динамики их изменения;
- оценка погрешности получаемых параметров движения;
- классификация судов по степени опасности;
- определение множества взаимодействующих судов, для которых формируются возможные сценарии движения;
- определение областей взаимных обязанностей судов, их соответствия МППСС-72 и границ зоны безопасности собственного судна;
- формирование множества возможных сценариев (стратегий) движения судов;
- определение стратегий движения, отвечающих заданным критериям безопасности;
- моделирование возможных сценариев развития навигационной ситуации на основе принципов траекторно-целевого управления;
- выработка возможных альтернатив по управлению судном и предоставление их судоводителю.

В настоящее время отсутствуют достаточно общие подходы к решению проблемы группового управления N -судами ($N > 2$) – активными объектами при их функционировании в заранее неизвестной, недетерминированной среде. При управлении несколькими судами (больше двух) прежде всего возникает ряд весьма сложных задач, в первую очередь, связанных с **проблемой организации коллективного взаимодействия отдельных судов** [3] для наиболее эффективного достижения цели, поставленной перед N -судами. В общем случае эта задача разбивается на ряд подзадач, среди которых можно выделить следующие:

- определение состава группы, способной эффективно решить целевую задачу;
- распределение функций между судами для оптимального (или близкого к нему) решения целевой задачи;

- реализация функций отдельными судами для достижения конечной цели.

При распределенном управлении N -судами возникает ряд весьма сложных задач, в первую очередь, связанных с проблемой **организации коллективного взаимодействия** [3] **отдельных судов** для наиболее эффективного достижения цели.

В настоящее время принят такой подход к постановкам задачи предупреждения столкновения судов, что **критерий расхождения** судов на заданное расстояние $-d_i$ задается судоводителем до начала решения задачи на ЭВМ. Однако субъективизм выбора критерия d_i крайне велик в этом случае. Очевидно, что критерии расхождения судов определяются условиями плавания (открытое море, море + пролив, прибрежное плавание, плавание в узкостях). Выбор того или иного численного значения критерия d_i полностью определяется факторами состояния окружающей среды, а также степенью ее неопределенности по различным показателям, параметрам и характеристикам ситуации встречи судов. Если на практике в открытом море заданный критерий d_i – принимают в интервале от одной до двух миль, то при плавании в стесненных условиях принятие d_i заранее проблематично. Безопасность расхождения судна на d_i рассчитывается по результатам оценки множества факторов. Среди таких факторов могут быть как внешние факторы окружающей среды, так и внутренние факторы, характеризующие эксплуатационные показатели судна.

Проблеме распределенного управления посвящен ряд крупных научно-исследовательских проектов, выполняемых в наиболее развитых в технологическом отношении странах мира, таких как США, Япония, Германия, Китай и Россия. Анализ результатов этих проектов показывает, что в настоящее время **отсутствуют достаточно общие подходы к решению проблемы распределенного управления судами при их функционировании** в заранее неизвестной, недетерминированной среде [3].

В целом необходимо отметить, что управление судами с целью их эффективного взаимодействия является комплексной проблемой. С одной стороны, требуется разработка методов и алгоритмов управления взаимосвязанными действиями отдельных судов, направленными на достижение общей (групповой) цели, а с другой стороны, — разработка методов и средств реализации этих действий в реальном времени и с учетом изменений, происходящих в среде.

Обычно для достижения цели управления судов в группе требуются не все суда, поэтому в группе судов, прежде всего, должны автономно образовываться «специфические структуры» – **кластеры** [3], которые ориентированы на достижение цели. Следовательно, алгоритмическое и программное обеспечение устройств управления группы судов должно обеспечивать возможность протекания процесса **самоорганизации** [3]. Этот процесс, очевидно, должен быть ориентирован, с одной стороны, на формирование кластера в группе состоящей из N -судов, а с другой стороны, на формирование системы управления этим кластером, т. е. структуры и алгоритма работы вычислительного комплекса данного кластера, ориентированных на достижение поставленной цели [3]. Первый, и пожалуй, единственный подход самоорганизации группы судов состоит в том, что кластер может быть сформирован методами теории интеллектуальных систем самими судами в реальном времени на основе единой цели с учетом маневренных особенностей судов по Правилам плавания и маневрирования [7].

Судно исключается из рассмотрения при формировании сценариев группового взаимодействия в случае идентификации его как безопасного, но мониторинг параметров движения такого судна продолжается при нахождении его в пределах зоны действия кластера. Для опасных и потенциально опасных судов формируется **многошаговая стратегия расхождения** на весь прогнозируемый период их нахождения в зоне взаимных обязанностей, с последующей коррекцией стратегии в случае, если текущее развитие ситуации будет отличаться от прогнозируемого.

В рамках отмеченной выше специфики необходимо конкретизировать – что будет пониматься под **оптимальным поведением судна**. Предложим определение оптимального поведения, по работе [5], следующим образом: принимающее решение судно, предпочтения которого описываются скалярной целевой функцией, стремится выбором контролируемых им параметров максимизировать значение целевой функции – расхождения судов на безопасном расстоянии. Дополнительно, кроме согласованных и оптимальных действий по предупреждению столкновений требуется, чтобы эти действия были эффективными и своевременными с тем, чтобы суда разошлись на безопасном расстоянии. Оптимальность в рамках РАСУБС может быть определена введением функционала $\Phi^0(y): AC' \rightarrow \mathfrak{R}^l$ (где \mathfrak{R}^l – область, отражающая допустимую эффективность состояния управляемой системы судна – АС). Содержательно, Φ^0 отражает предпочтения

управляющей системы относительно действий активных элементов внутренней структуры судна (АЭ). Следовательно, эффективность судна определяется значением этого функционала на множестве реализуемых равновесных управлений АЭ [6].

Кроме того, разрабатываемая РАСУБС дополнительно должна обладать возможностью самообучения. Если описание системы содержит неизвестные параметры, а входные сигналы являются стохастическими, и если система с течением времени снижает степень неопределенности, то в этом случае система является **обучающейся** [12]. Если к тому же система проявляет интеллектуальные способности, такие, как принятие решений, планирование и т.д., то ее будем называть **системой с элементами интеллекта** [12]. Управляющее воздействие при обучении может рассчитываться в отрыве от непосредственного процесса управления. В этом случае управляющее устройство допускает возможность настройки с помощью «учителя».

Современный подход в построении РАСУБС в большей мере должен быть связан с управленческим подходом, при этом координаты состояния системы из первоначально независимых в результате действия управления могут превращаться в частично или полностью зависимые с целью обеспечения движения системы по желаемой траектории. Динамический подход определяет, какая сущность следует за другой сущностью и как они взаимодействуют между собой [4]. Согласно этому подходу первопричиной безопасности в системе является **динамика**, т.е. взаимодействие между элементами системы, а наблюдаемые нами физические явления и процессы представляют собой некоторые формы этого взаимодействия.

Для разработки РАСУБС целесообразно использовать **когнитивные концепции**. В соответствии с исследованиями [9, 10, 11], суть когнитивной концепции «смысла» состоит в том, что факты рассматриваются как причины, и их смысл считается известным, если известны последствия данного факта. Таким образом, понимание смысла определенных конкретных событий ПСС заключается в выявлении причинно-следственных взаимосвязей между этими событиями. Такая когнитивная концепция «смысла» является убедительной и хорошо обоснованной. Поэтому за основу исследования предлагается проблему навигационных аварий изучать с точки зрения анализа соответствия «причинно-следственных связей», «закономерностей поведения судов» и, как следствие, «выполнимости МППСС-72». Для

этих целей терминологии МППСС-72, выраженной в лингвистической форме недостаточно, в данном случае может потребоваться также количественная формулировка. Поэтому ставится вопрос о проведении специальных исследований для выявления и количественного измерения величины и направления влияния подобных связей. Предлагается в качестве эмпирической базы использовать статистические данные, характеристики, особенности и натурные испытания крупнотоннажных судов, чтобы на основании сопоставительного анализа сделать выводы об адекватности существующей модели РАСУБС и предложить модель, основанную на принципах искусственного интеллекта.

Результатом работы РАСУБС является графическая визуализация ситуации с указанием рекомендуемых изменений параметров движения собственного судна с целью исключения рисков столкновения и безопасного плавания в любых условиях.

Таким образом, учитывая теоретические исследования в области искусственного интеллекта и технический уровень состояния навигационных систем, систем связи и вычислительных возможностей, в настоящее время складываются условия перспективного развития новых технических методов и технологий решения задач безопасности и предупреждения столкновения судов. По существу, кратко упомянутые технологии представляют собой качественно новую систему организации мореплавания, предотвращения столкновений и гибели судов, которые будут актуальными в ближайшие десятилетия.

Литература

1. Бредихин К.Н., Варшавский П.Р. Распределенный вывод на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // Теория и практика системного анализа: тр. I Всерос. науч. конф. молодых ученых. – Рыбинск: РГАТА им. П.А. Соловьева, 2010. Т. 1. – С. 57–62.1.
2. Васильев С.Н., Жернов А. К., Федосов Е. А., Федун Б. Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит, 2000. – 352 с.
3. Каляев И.А. Методы и модели коллективного управления в группах роботов / И.А. Каляев, А.Р. Гайдук, С.Г. Капустян. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 280 с.
4. Красовский Н. Н. Управление динамической системой. Задача о минимуме гарантированного результата. – М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит., 1985. – 520 с.
5. Кротов В.Ф., Лагоша Б.А. и др. Основы теории оптимального управления /под ред. В. Ф. Кротова. — М.: Высшая школа, 1990. – 430 с.

6. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. — М.: Наука, 1975. — 526 с.
7. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС-72) [Текст]: [сборник]. - М.: РКонсульт, 2004. - 80с.
8. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами: Пер. с англ. /под ред. Б. Р.Левина. — М.: Радио и связь, 1982. — 392 с.
9. Симанков, В. С. Автоматизация системных исследований: монография (научное издание) / В.С. Симанков. – Краснодар: КубГТУ, 2002. – 376 с.
10. Симанков, В. С. Структура и методология функционирования интеллектуальной системы ситуационного центра./ В.С. Симанков, А.Н. Черкасов // Журнал «Глобальный научный потенциал». – 2015. – № 12.
11. Симанков, В. С. Методологические аспекты построения систем поддержки принятия решений / В.С. Симанков, А.Н. Черкасов, А.О. Денисенко, С.Н. Владимиров // Журнал «Вестник Донского государственного технического университета». – Издательский центр ДГТУ. – 2008. – Т.8. – № 3(38). – С. 258–267.
12. Справочник по теории автоматического управления /Под ред. А. А.Красовского. — М.: Наука, 1987. — 712 с.

REFERENCES

1. Bredihin K.N., Varshavskij P.R. Raspredeleennyj vyvod na osnove precedentov v intellektual'nyh sistemah podderzhki prinyatiya reshenij // Teoriya i praktika sistemnogo analiza: tr. I Vseros. nauch. konf. molodyh uchenyh. Rybinsk: RGATA im. P.A. Solov'eva, 2010. T. 1. S. 57–62.1.
2. Vacil'ev C.N., ZHernov A. K., Fedocov E. A., Fedunov B. E. Intellektnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami. — М.: Fizmatlit, 2000. — 352 с.
3. Kalyaev I.A., Metody i modeli kollektivnogo upravleniya v gruppah robotov/ Kalyaev I.A., Gajduk A.R., Kapustyan S.G./ . – М.: FIZMATLIT, 2009. – 280 s.
4. Kracovckij N. N. Upravlenie dinamicheskoy cistemoj. Zadacha o minimume garantirovannogo rezultata. — М.: Nauka. Glav. red. fiz.-mat. lit., 1985. — 520 с.
5. Krotov V.F., Lagosha B.A. i dr. Ocnovy teorii optimal'nogo upravleniya /Pod red. V. F.Krotova. — М.: Vysshaya shkola, 1990. — 430 с.
6. Moiceev N.N. Elementy teorii optimal'nyh sistem. — М.: Nauka, 1975. — 526 с.
7. Mezhdunarodnye pravila preduprezhdeniya stolknovenij sudov v more 1972 (MPPSS-72) [Tekst]: [sbornik]. - М.: RKonstult, 2004. - 80s.
8. Cejdzhe P., UajtCH.C., III. Optimal'noe upravlenie sistemami: Per. c angl. /Pod red. B. R.Levina. — М.: Radio i svyaz', 1982. — 392 с.
9. Simankov, V. S. Avtomatizaciya sistemnyh issledovaniy: monografiya (nauchnoe izdanie) / V.S. Simankov. – Krasnodar: KubGTU, 2002. – 376 s.

10. Simankov, V. S. Struktura i metodologiya funkcionirovaniya intellektual'noj sistemy situacionnogo centra. / V.S. Simankov, A.N. CHerkasov // ZHurnal «Global'nyj nauchnyj potencial». – 2015. – № 12.
11. Simankov, V. S. Metodologicheskie aspekty postroeniya sistem podderzhki prinyatiya reshenij / V.S. Simankov, A.N. CHerkasov, A.O. Denisenko, S.N. Vladimirov // ZHurnal «Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta». – Izdatel'skij centr DGTU. – 2008. – Т. 8. – № 3(38). – S. 258–267.
12. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya / Pod red. A. A. Krasovskogo. — М.: Nauka, 1987. — 712 с.

УДК 656.61

DOI: 10.34046/aumsuomt96/9

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СППР БЕЗОПАСНОСТИ СУДОВОЖДЕНИЯ

В.В. Астреин, доктор технических наук

В данной статье рассматриваются базовые математические методы к решению проблемы обеспечения глобальной безопасности судовождения при плавании судна в сложных условиях в некотором распределенном географическом пространстве.

Ключевые слова: безопасность, принятие решений, МППСС-72, функциональность, коллективное взаимодействие судов, критерий расхождения судов на заданное расстояние.

This article discusses the basic mathematical methods for solving the problem of ensuring the global safety of navigation when a vessel navigates in difficult conditions in a certain distributed geographic space.

Keywords: safety, decision-making, COLREGs-72, functionality, collective interaction of vessels, criterion of separation of vessels at a given distance.

Исследуемая Система Безопасности судо-вождения (СБС) состоит из некоторого множества судов – динамических объектов, распределенных в некотором географическом районе с достижением основной цели – обеспечение комплексной безопасности. Обеспечение безопасности судна осуществляется по человеко-машинной технологии. За последние годы судно обрело технические возможности моделирования себя, окружающую среду и осуществлять взаимообмен информацией с другими судами. Эти технические достижения позволили определить механизмы совершенствования и развития СБС. Одним из таких путей является внедрение Интеллектуальных систем поддержки принятия решений судоводителей (ИСППР) – автоматизированных систем, специально предназначенных для подготовки информации, необходимой судоводителю для принятия решения.

Первоначальным шагом при решении задач безопасности, решаемых в ИСППР является адекватное формализованное представление исследуемых процессов, т.е. построение математических моделей рассматриваемой системы. Построение полной модели СБС – чрезвычайно сложная задача анализа, а использование такой модели в процедуре выработки решений не представляется реальным ввиду переменного количества взаимодействующих судов, их подсистем, элементов, связей и возможного изменения их состава, и конфигурации. Поэтому общую модель

СБС предлагается разбить на единичные суда, их подсистемы и элементы. Тогда эта модель судна будет состоять из иерархической последовательности моделей вложенных подсистем. Такой подход позволяет декомпозировать модель безопасности единичного судна на ряд условно изолированных подсистем, которые в свою очередь разбиваются на элементы более низкого уровня иерархии.

Деятельность, в рассматриваемой системе, с целью обеспечения глобальной безопасности осуществляется одновременно на следующих уровнях взаимодействий:

- взаимодействие внутренних подсистем судна («по подсистемам»);
- взаимодействие с окружающей средой («судно-природа»);
- взаимодействие с другими судами («группа судов»).

Таким образом, построение глобальной стратегии безопасности представляет собой поэтапный процесс. Иначе говоря, сначала должны быть сформированы принципы безопасности для всех подсистем. Далее рассматриваются группы подсистем, объединенных по объектному, технологическому, функциональному и др. признакам; исследуется специфика и характер взаимодействия подсистем группы; строится модель взаимодействия и разрабатывается координирующая стратегия управления группы подсистем, которая обеспечивает согласованное функционирование