

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695

COOPERATIVE MANEUVERING OF UNMANNED SHIPS FOR COLLISION AVOIDANCE AT SEA

S. V. Smolentsev¹, A. E. Sazonov¹, Yu. M. Iskanderov²

1 — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

2 — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian
Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

The article investigates the problem of collision avoidance of a group of ships offshore. To solve this problem it is necessary to ensure the cooperative maneuvering of several vessels from the group. The article looks into the case of unmanned ships, when each vessel is operated automatically. The use of unmanned technologies can eliminate the human factor on the safety of navigation. For this, it is necessary to develop reliable ship control algorithms in automatic mode.

The publication proposes an algorithm for solving this problem. To this end, from the total amount of vessels in a given area we distinguish between the subsets of dangerous ships, privileged vessels, vessels obliged to maneuver, and ships that restrict the scope of solution. A method for constructing these subsets is described. A subset of dangerous ships is constructed by pair wise assessing the danger of rapprochement of each vessel with the rest of the vessels from the group. For this, it is necessary to synthesize forecasts of the trajectories of all vessels in the water area. A risk scale and an algorithm for estimate the collision of ships are proposed. A number of dangerously moving ships are divided into two subsets: privileged vessels and vessels obliged to maneuver. A safe divergence must be ensured by maneuvering these vessels. The remaining vessels in the water area are restrictions when seeking a solution. In the case where no solution can be found, a procedure to reduce the restrictions by moving ships from one set to another and re-searching for solutions is proposed. The final answer can be a set of changed routes for vessels obliged to maneuver.

To carry out cooperative action is necessary to ensure the exchange of information between the automatic agents. This topic is also touched upon in the article.

Keywords: unmanned ship, cooperative maneuvering, collision avoidance, COLREG-72.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Yurii M. Iskanderov. "Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.

УДК 656.61.052

КООПЕРАТИВНОЕ МАНЕВРИРОВАНИЕ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО РАСХОЖДЕНИЯ В МОРЕ

С. В. Смоленцев¹, А. Е. Сазонов¹, Ю.М. Искандеров²

¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматривается проблема безопасного расхождения группы судов в море. Для ее решения необходимо обеспечить кооперативное маневрирование нескольких судов из этой группы. Рассматривается ситуация безэкипажных судов, когда каждым судном управляет автоматический агент. Использование безэкипажных технологий позволяет исключить влияние человеческого фактора на безопасность мореплавания. Для этого необходимо разработать надежные алгоритмы управления судами в автоматическом режиме. Предложен алгоритм решения данной задачи. Для этого во множестве судов в заданной акватории выделяются подмножества опасно идущих судов, привилегированных судов, судов, обязанных маневрировать, судов, представляющих ограничения для решения. Описан метод построения указанных

подмножеств. Подмножество опасно идущих судов строится путем попарной оценки опасности сближения каждого судна с остальными судами из группы. Для этого необходимо синтезировать прогнозы траекторий движения всех судов в акватории. Предложена шкала риска и алгоритм оценки опасности сближения судов. Множество опасно идущих судов делится на два подмножества: привилегированные суда и суда, обязанные маневрировать. Безопасное расхождение необходимо обеспечить маневрированием этих судов. Остальные суда в акватории являются ограничениями при поиске решения. В случае отсутствия решения предлагается процедура смягчения ограничений за счет перемещения судов из одного множества в другое и повторного поиска решений. Полученное решение является набором измененных маршрутов для судов, обязанных маневрировать. Для проведения кооперативных действий необходимо обеспечить обмен информацией между автоматическими агентами. Этот вопрос также затронут в статье.

Ключевые слова: безэкипажное судно, кооперативное маневрирование, предупреждение столкновений, МППСС-72.

Для цитирования:

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 имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.

Введение (Introduction)

Одной из современных концепций развития морского судоходства является концепция безэкипажного судна. Разработка безэкипажного судна ставит новые задачи в области обеспечения безопасности мореплавания и, в частности, такой важной ее составляющей, как обеспечение безопасного расхождения судов в море.

Проблема безопасного расхождения судов в море является одной из классических проблем судовождения. В XX в. для ее решения была принята Конвенция о Международных правилах предупреждения столкновений судов в море, приложением к которой, собственно, и являются Правила МППСС-72 [1]. Выполнение Правил МППСС-72 является обязательным для гражданских судов, однако их применение не гарантирует безопасности мореплавания ввиду следующих причин:

- не учитывают навигационных ограничений в районе плавания;
- регламентируют расхождение двух судов, но не применимы в случае встречи нескольких судов.

Тем не менее МППСС и в настоящее время являются основным инструментом для обеспечения безопасного расхождения судов в море. Однако этот документ определяет принципы и основные правила поведения судоводителей в различных ситуациях встречи судов, но не дает четких указаний и не предписывает конкретных маневров для расхождения. Поэтому конкретные действия судоводителей для безопасного расхождения в реальных условиях встречи судов в море диктуются не только МППСС, но и «хорошей морской практикой», которая для каждого судоводителя определяется его собственным опытом. Таким образом, человеческий фактор является ключевым при традиционном решении задачи безопасного расхождения в море.

Автоматизация процессов управления — единственный путь ослабления влияния человеческого фактора и конечной стадией этого процесса является переход к безэкипажным судам. В литературе [2] – [10] большое внимание уделяется различным вопросам автоматизации процессов расхождения.

Основные принципы построения интеллектуальных систем управления изложены в работе [2]. Вопросы формализации МППСС-72 рассмотрены в работе [5]. Работы Л. Л. Вагушенко [6], [7] посвящены использованию интеллектуальных систем в навигации, в том числе и при решении задач расхождения судов. Траекторный подход к решению задачи безопасного расхождения судов, учитывающий требования МППСС-72, предложен в работах [8] – [10].

Переход к безэкипажным судам приводит к тому, что вместо судоводителя (ЛПР — лица, принимающего решения) управление судном осуществляет автомат (АПР — автомат, принимающий решения). Это кардинально меняет постановку задачи обеспечения безопасного расхождения судов в море, а именно:

- решение принимается в автоматическом режиме;
- исключается влияние человеческого фактора;
- возможно принятие кооперативных решений несколькими АПР.

В данной статье рассматривается третий указанный аспект, а именно проблема принятия кооперативных решений группой АПР для безопасного расхождения группы судов, управляемых этими АПР.

Для выработки коллективного решения группой автоматов может быть использована *теория мультиагентных систем* (МАС). Подобный подход к решению данной проблемы был предложен автором в работе [11]. В данной статье этот подход будет дополнен результатами, опубликованными в работах [12] – [14].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе рассматривается задача совместного маневрирования группы судов с целью их безопасного расхождения и принципы ее решения. Эта задача возникает в районах интенсивного судоходства, когда ситуация опасного сближения может создаваться более чем для двух судов либо попытка маневрирования судна во избежание столкновения может приводить к опасному сближению с другими судами. В подобных ситуациях несколько судов должны совершить согласованные маневры, чтобы привести к безопасному расхождению всех судов в группе.

Постановка задачи

Рассмотрим множество U судов в заданной акватории. В нем может быть определено подмножество (группа) судов G , в котором находятся объекты трех классов:

- класс A — суда, которые идут опасно с другими судами, но не могут маневрировать, из-за их привилегий в соответствии с МППСС-72 или других причин;
- класс B — суда, которые идут опасно с другими судами и обязаны маневрировать;
- класс C — суда, которые не представляют опасности для других судов, но могут маневрировать.

Соответственно $G = A \cup B \cup C$.

Кроме того, в акватории могут находиться другие суда (класса D). Ни одно из судов группы D не идет опасно относительно любых судов в акватории. В противном случае эти суда также включаются в группу G . Суда, не включенные в группу G , выступают как ограничения для решений, принимаемых для судов данной группы. С каждым судном связан агент, управляющий этим судном (либо ЛПР, либо АПР). У каждого агента существует своя целевая функция — заданный маршрут следования судна в данной акватории.

Действиями агентов необходимо разрешить конфликт, т. е. предотвратить опасное сближение судов внутри группы G . Для этого нужно изменить маршруты судов внутри группы так, чтобы между ними не возникала ситуация опасного сближения и при этом минимизировалось общее отклонение всех маршрутов судов в группе от начальных.

Результаты (Results)

Для обеспечения безопасности мореплавания в заданной акватории необходимо прежде всего детектировать наличие опасности для судов, т. е. определить наличие конфликта в группе всех судов в акватории, а уже затем, в случае наличия этого конфликта, находить решение, способное его разрешить. Таким образом, общий алгоритм должен быть следующим (см. рисунок):

1. Из множества всех судов в акватории выделяется группа судов G , в которой существует конфликт — опасное сближение.
2. Найденная группа делится на два множества: A и B . Множество $C = \emptyset$, множество D — все остальные суда в акватории.
3. Проводится поиск решения в группе за счет возможного маневрирования судов из множества $B \cup C$.
4. Если решение найдено, переходим к пп. 6.

5. В случае отсутствия решения из множества D выбирается судно, которое включается в множество C . В случае, если $D = \emptyset$, и решение не найдено, необходим выход, в противном случае — переход к пп. 3

6. Вывод решения.

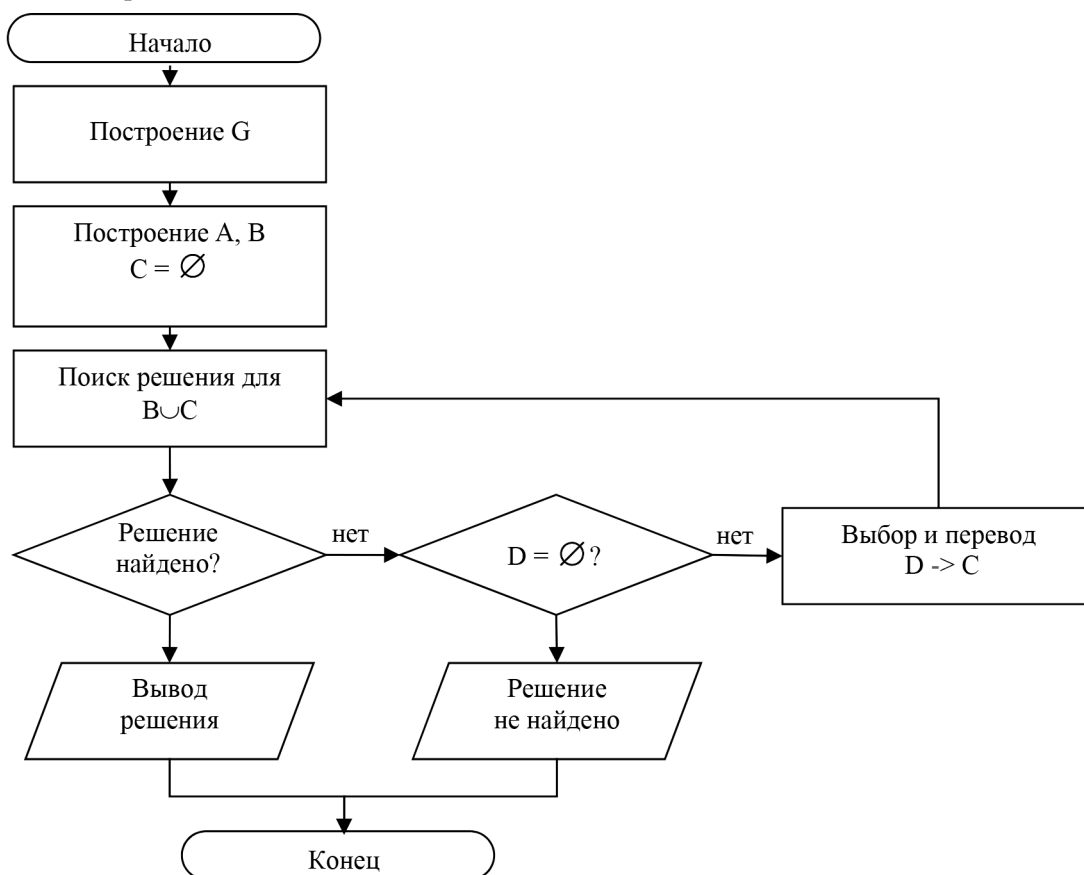


Схема алгоритма

Рассмотрим отдельные подзадачи, решаемые при реализации разработанного алгоритма.

1. Построение множества G . Первоначально в множество G входят суда, для которых существует ситуация опасного сближения. Для построения этого множества необходимо оценить для каждого из судов из множества U опасность сближения с остальными судами. В случае детектирования ситуации опасного сближения в множество G включается как само это судно, так и суда, с которыми определена ситуация опасного сближения.

Решение задачи оценки опасного сближения для одного судна с другими судами предложено в работе [13]. Для группы судов оно может быть расширено следующим образом.

Для каждого судна $u \in U$ строят $S_i^e(u)$ — оценку навигационной ситуации.

Оценка навигационной ситуации производится на основе прогноза развития навигационной ситуации и имеющейся информации о районе плавания:

$$S_i^e = \langle e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J} \rangle = E(S_i^f, \mathbf{R}, K_e),$$

где S_i^f — прогноз навигационной ситуации; $\mathbf{R}$ — статическая составляющая навигационной ситуации (информация о районе плавания и заданном маршруте данного судна); K_e — знания об оценках навигационных ситуаций.

Прогноз навигационной ситуации S_i^f строится на основе прогнозов траекторий движения всех судов из множества U на заданный промежуток времени:

$$S_i^f = \langle Tr_0, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle = F(S_{-1}, \mathbf{R}, M, K_f),$$

где Tr_0 — прогноз траектории данного судна; Tr_j — прогноз траектории судна-цели; $S_{-1} = \{S_t\}_{t \in [-T, -1]}$ — последовательность векторов предшествующих навигационных ситуаций; M — множество моделей динамики судов из множества U ; K_f — знания о прогнозировании траектории с учетом ограничений.

Для построения прогнозов траекторий всех судов необходимо использовать их динамические характеристики. При расчете траекторий также учитывается район плавания (ограничения, накладываемые глубинами, специальными районами, а также рекомендованные маршруты).

При решении задачи оценки навигационной ситуации в качестве значимых факторов приняты следующие риски для каждого из судов:

- риск столкновения с другими судами,
- риск выхода на мелководье,
- риск выхода на навигационные опасности,
- риск выхода в зоны, запретные для плавания.

Для оценки риска столкновения с другими судами проводится попарная проверка безопасности прогнозируемой траектории каждого судна с прогнозируемыми траекториями других судов из множества U . При этом оцениваются стандартные параметры: время и дистанция кратчайшего сближения, которые формируют множество параметров оценок риска (J — множество судов-целей $J = U/u$, где u — выбранное судно):

$$P^s = \{P_j^s\}_{j \in J};$$

$$P_j^s = \langle D_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j), T_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j) \rangle.$$

Аналогичным образом строится множество параметров оценки риска выхода на мелководье, выхода в запретные зоны и на навигационные опасности. Для этого определяются время и дистанция кратчайшего сближения с соответствующей навигационной опасностью (L — множество навигационных опасностей и ограничений в районе плавания):

$$P^N = \{P_l^N\}_{l \in L};$$

$$P_l^N = \langle D_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l), T_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l) \rangle.$$

Объединив полученные множества, получаем общее множество параметров оценок риска для каждого судна из множества U :

$$P = P^s \cup P^N = \{P_i\}_{i \in I}.$$

Для оценки степени опасности каждого из объектов объединенного множества I используется шкала из трех категорий $RYG = \langle \text{RED} \rangle \langle \text{YELLOW} \rangle \langle \text{GREEN} \rangle$ ($\langle \text{опасно} \rangle \langle \text{внимание} \rangle \langle \text{безопасно} \rangle$). Каждый потенциально опасный объект (судно-цель, навигационный объект) относится к одной из категорий в зависимости от установленных зон безопасности судна, рассчитанных параметров кратчайшего сближения, а также динамики изменения этих параметров. Для этого вводятся две зоны: *опасная зона* (сближение на дистанцию менее D^* считается опасным и его следует избегать) и *зона усиленного внимания* (сближение на дистанцию менее D^{**} , но более D^* считается потенциально опасным и требует внимания со стороны судоводителя). Кроме того, вводится время T^* — «горизонт» учета опасных событий. Параметры T^* , D^* и D^{**} существенно зависят от текущих условий плавания и характеристик собственного судна и должны устанавливаться судоводителем. Отнесение каждого из опасных объектов к одной из категорий производится по следующим правилам:

$$(D_{ki} > D^{**}) \rightarrow Q_i = \text{GREEN};$$

$$(D_{ki} > D^*) \& (D_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = \text{GREEN};$$

$$(D_{ki} > D^*) \rightarrow Q_i = YELLOW;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (T_{ki} > T^*) \rightarrow Q_i = YELLOW;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (\dot{D}_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = YELLOW;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \rightarrow Q_i = RED.$$

Приведенные правила применяются по порядку сверху вниз и при выполнении какого-либо из условий определяют значение критерия, и проверку следующих условий не проводят. Таким образом, оценку безопасности для каждого навигационного объекта или судна-цели получают по определенной выше шкале риска:

$$e(Tr_0) = \min(Q_i), l \in L;$$

$$e(Tr_0 \circ Tr_j) = Q_j, j \in J.$$

Комплексная оценка безопасности определяется по наиболее опасному объекту:

$$S_i^e = \min(e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J}).$$

Таким образом, для каждого из судов $u \in U$ строится комплексная оценка безопасности — $S_i^e(u)$. Значение этой оценки является критерием для включения судна в множество G :

$$G = \{u \in U, S_i^e(u) = RED\}.$$

2. Распределение обязанностей внутри группы G. Все суда, попавшие в группу G , находятся в ситуации опасного сближения с другими судами из этой же группы. В общем случае множество G может распадаться на несколько подмножеств, в каждом из которых находятся суда, опасно сближающиеся с другими судами этого подмножества, но не опасные для судов из других подмножеств: $G = \bigcup G_i$. Однако в данной статье будет рассматриваться упрощенный случай — наличие только одного такого подмножества. Т. е. все суда, включенные в множество G , опасно сближаются друг с другом.

Все суда из множества G делятся на два класса по отношению к обязанностям по маневрированию с целью предупреждения столкновения.

К классу A относятся суда, которые являются привилегированными по отношению к другим судам из множества G и им должны уступать дорогу другие суда. Такая привилегия возникает либо вследствие статуса судна (суда, стесненные своей осадкой, занятые ловом рыбы, ограниченные в маневрировании и т. п.), либо вследствие их взаимного положения в ситуации встречи с другими судами. В любом случае это регламентируется МППСС-72 и может быть легко формализовано.

К классу B относятся все остальные суда из множества G : $B = G/A$. Суда из этого множества обязаны предпринять маневр для разрешения ситуации опасного сближения всех судов в группе G .

3. Поиск оптимального решения внутри группы G. Поиск решения осуществляется для судов из множества $B \cup C$. Изначально множество C — пустое и поиск решения проводится только при использовании судов из множества B . Однако это не всегда приводит к успеху, т. е. маневрированием только судов из множества B задача обеспечения безопасного расхождения не решается. В этом случае из множества D выбираются суда, изначально находящиеся в состоянии безопасного движения и включаются в состав множества C . Процедура поиска решения и (при необходимости) пополнения множества C повторяется до тех пор, пока решение не будет найдено.

Искомым решением является набор новых маршрутов для судов из множества $B \cup C$, приводящих к разрешению конфликта, т. е. безопасному расхождению всех судов в группе. Кроме того, движение по новым маршрутам не должно приводить к возникновению ситуации опасного сближения с судами из множества D , которые изначально находились в безопасной ситуации. Та-

ким образом, множество D является ограничением при выборе решений. Принципы и алгоритмы решения задачи расхождения для одного судна изложены в [14]. В данном случае необходимо расширить этот алгоритм на несколько судов из множества $B \cup C$.

Критериями оптимизации общего решения являются: минимум количества судов из множества $B \cup C$, маршруты которых изменяются, а также минимум суммы отклонений всех новых маршрутов от планируемых ранее для тех судов, маршруты которых изменяются.

4. Выбор судна из множества D для включения в множество C . Как отмечалось ранее, при поиске решений для судов в текущей конфигурации множества $B \cup C$ возможна ситуация отсутствия решения. Причинами этого могут быть ограничения на возможные маневры со стороны судов из множества D . Эти суда безопасно движутся по своим маршрутам и не влияют на уровень опасности столкновения для судов из множества G , однако некоторые маневры судов из множества $B \cup C$ приводят к ситуации опасного сближения с этими судами и поэтому удаляются из множества решений. Это может привести к тому, что множество решений оказывается пустым.

Выход из этой ситуации возможен путем ослабления ограничений, т. е. перевода судов из множества D в множество C . В этом множестве находятся суда, которые изначально движутся безопасно относительно остальных судов в акватории (иначе они бы принадлежали множеству $A \cup B$), однако без их маневрирования невозможно решить общую задачу обеспечения безопасности для группы G . Очевидно, что следует стремиться к минимизации количества элементов множества C . Изначально это множество пустое. И только при отсутствии решения в это множество необходимо перевести из множества D одно судно и проверить возможность построения нового решения. Таким образом, можно построить итеративный алгоритм поиска решения при условии пополнения множества C судами из множества D и тем самым ослабления ограничений при поиске решения.

Таким образом, важным является выбор судна из множества D для перемещения в множество C . Для этого определяют те суда из множества D , которые ограничивают выполнение маневров судами из множества $B \cup C$, приводящих к разрешению конфликта. Эти суда и являются «кандидатами» для включения их в множество C . При этом надо проверить, не попадет ли это судно в множество A при включении его в данную группу. В данном случае данное судно не должно включаться в группу, поскольку это не приведет к разрешению конфликта (судно не сможет маневрировать).

Обсуждение (Discussion)

Реализация предложенного в статье подхода к решению задачи обеспечения безопасности мореплавания возможна только в среде безэкипажных судов. В этом случае задача решается совместно агентами, управляющими судами в заданной акватории, либо одним агентом, которому делегируется функция обеспечения безопасности в данной акватории (например, эту функцию выполняет система управления движением судна — СУДС).

Для решения задачи безопасного расхождения судов в море, в соответствии с разработанным алгоритмом, необходимо обеспечить обмен информацией между агентами, управляющими этими судами. Прежде всего, это данные о планируемых маршрутах и параметрах динамики судов. Эта информация используется для построения прогнозов траекторий движения судов в задачах оценки безопасности и поиска решений по расхождению. Кроме того, необходим обмен между агентами полученными решениями для проведения согласованных маневров по расхождению.

Выводы (Summary)

1. В статье изложены основные принципы решения задачи кооперативного маневрирования для обеспечения безопасного расхождения судов в море. Предложенный алгоритм позволяет находить решение в виде измененных маршрутов судов, приводящее к безопасному расхождению группы судов с учетом их динамики, навигационных ограничений и Правил МППСС-72. Найден-

ное решение позволяет не только обеспечить безопасное расхождение группы судов, но и минимизирует количество судов, изменяющих маршрут своего движения, а также минимизирует эти изменения.

2. Задача решается агентами, управляющими судами в автоматическом режиме. Таким образом, обеспечивается безопасное расхождение безэкипажных судов в заданной акватории. Однако открытым остается вопрос взаимодействия безэкипажных судов, управляемых АПР (агентами) с судами, управляемыми ЛПР (судоводителями). Эта проблема требует дополнительного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
3. Johansen T. A. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment / T. A. Johansen, T. Perez, A. Cristofaro // IEEE transactions on intelligent transportation systems. — 2016. — Vol. 17. — Is. 12. — Pp. 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
4. Woerner K. L. Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles / K. L. Woerner, M. R. Benjamin, M. Novitzky, J. J. Leonard // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
5. Цымбал Н. Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.
6. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
7. Вагущенко Л. Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
8. Dmitriev S. P. Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework / S. P. Dmitriev, N. V. Kolesov, A. V. Osipov // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33. — Is. 21. — Pp. 373–377. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37103-3.
9. Дмитриев С. П. Автоматический синтез траекторий движения как средство интеллектуальной поддержки судоводителя / С. П. Дмитриев и [др.] // Гирскопия и навигация. — 2001. — № 3 (34). — С. 19–31.
10. Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.
11. Смоленцев С. В. Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы / С. В. Смоленцев // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2. — С. 19–24.
12. Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.
13. Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
14. Смоленцев С. В. Автоматический синтез решений по расхождению судов в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-7-16.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72)*. 5 ed. M.: Morkniga, 2011.
2. Vasilev, S.N., A.K. Zherlov, E.A. Fedosov, et al. *Intellektualnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami*. M.: Fizmatlit, 2000.

3. Johansen, Tor Arne, Tristan Perez, and Andrea Cristofaro. "Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment." *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 17.12 (2016): 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
4. Woerner, K.L., M.R. Benjamin, M. Novitzky, and J.J. Leonard. "Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles." *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. IEEE, 2016. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
5. Cymbal, N.N., and R.Ju. Buzhbeckij. "Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstvija sudov pri rashozhdenii." *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124–129.
6. Vagushhenko, L.L., and A.L. Vagushhenko. *Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami*. Odessa: Feniks, 2010.
7. Vagushhenko, L.L., and A.L. Vagushhenko. "Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov." *Sudovozhdenie* 15 (2008): 35–43.
8. Dmitriev, S.P., N.V. Kolesov, and A.V. Osipov. "Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework." *IFAC Proceedings Volumes* 33.21 (2000): 373–377. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37103-3.
9. Dmitriev, S.P., N.V. Kolesov, A.V. Osipov, and G.N. Romanycheva. "Avtomaticheskij sintez traektorij dvizhenija kak sredstvo intellektual'noj podderzhki sudovoditelja." *Gyroscopy and Navigation* 3(34) (2001): 19–31.
10. Dmitriev, S.P., N.V. Kolesov, A.V. Osipov, and G.N. Romanycheva. "System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256–263.
11. Smolentsev, S.V. "Formalization of the ships' collision avoidance at sea on the basis of MAS theory." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2011): 19–24.
12. Smolentsev, S.V., B.V. Afanasiev, A.E. Filyakov, and D.V. Kunits. "Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 11–14.
13. Smolentsev, Sergey Victorovich. "The problem of estimation of navigation situation in the sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
14. Smolentsev, Sergey Victorovich. "Automatic synthesis of decisions on vessels collision avoidance at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-7-16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru

Сазонов Анатолий Ефимович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Искандеров Юрий Марсович —
доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
14-я линия, д. 39
e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru

Sazonov, Anatolii E. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_avt@gumrf.ru

Iskanderov, Yurii M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences
39 14-th Linia VI Str., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru