

УДК 004.8

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.42.3.011](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.011)

Имитационное моделирование безопасного расхождения групп морских судов

А.В. Артемьев¹, В.М. Гриняк^{1,2,3}✉, А.С. Девятисильный³, В.А. Петров¹

¹Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

²Владивостокский государственный университет,
Владивосток, Российская Федерация

³Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

Резюме. Статья посвящена проблеме безопасного движения судов в условиях насыщенного трафика. Рассматривается задача безопасного расхождения групп судов. Отмечается, что расхождение автономных (безэкипажных) судов имеет свою особую специфику. При их групповом движении автономному судну необходимо «знать» намерения других участников для правильной интерпретации правил расхождения судов. Это требует расширения известных алгоритмов расхождения на случай группового движения. В статье описана математическая модель задачи расхождения судов, основанная на традиционных геометрических представлениях относительного движения судов. Дан алгоритм действий судна в условиях группового движения. Описан программный инструментарий, использованный для постановки вычислительных экспериментов по расхождению групп автономных судов. Отмечается, что предложенный алгоритм может быть успешно применен и для судов с экипажем, внедрен в автоматизированные бортовые средства управления судном. Показан пример расчета маневров для расхождения группы из семи судов. Указывается, что для проверки предложенного алгоритма и оценки перспектив его использования на практике необходима постановка натурных экспериментов для групп малоразмерных моделей автономных надводных судов. Даются рекомендации по возможной конструкции таких судов для постановки экспериментов и развитию соответствующей береговой инфраструктуры, позволяющей в перспективе обеспечить поддержку автономного судовождения.

Ключевые слова: управление движением судов, безэкипажное судоходство, E-Навигация, A-Навигация, опасное сближение, маневр уклонения, группа судов.

Благодарности: работа выполнена в рамках программы академического стратегического лидерства «Приоритет-2030», проект «Разработка алгоритмов автоматического расхождения судов в соответствии с МППСС-72, оценка их эффективности и безопасности».

Для цитирования: Артемьев А.В., Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Петров В.А. Имитационное моделирование безопасного расхождения групп морских судов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1418> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011

Collision avoidance modeling for a group of marine autonomous vessels

A.V. Artemiev¹, V.M. Grinyak^{1,2,3}✉, A.S. Devyatisilnyi³, V.A. Petrov¹

¹Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok,
the Russian Federation

²Vladivostok State University, Vladivostok, the Russian Federation

³Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok, the Russian Federation

Abstract. The paper deals with the issue of safe ship movement under the conditions of heavy traffic. The problem of avoiding the collision of groups of vessels is considered. It is noted that avoiding the collision of autonomous (unmanned) ships has its own specific nature. When moving in groups, an autonomous ship needs to “know” the intentions of other participants in order to correctly interpret the regulations for passing ships. This requires an extension of known collision avoidance algorithms for the cases of group locomotion. The paper describes a mathematical model of the ship collision avoidance problem based on traditional geometric representations of the relative motion of ships. The plan of actions for a vessel under the conditions of group locomotion is given. The software tools used to set up computational experiments in collision avoidance of groups of autonomous ships are described. It is noted that the proposed algorithm can be successfully applied to ships with a crew and implemented in automated onboard ship controls. An example of calculating maneuvers for collision avoidance of a group of seven vessels is shown. It is pointed out that setting up full-scale experiments for groups of small-sized models of autonomous surface vessels is necessary in order to test the proposed algorithm and assess the prospects for its use in practice. Recommendations on the possible design of such vessels are given with a view to setting up experiments along with the guidelines for the development of appropriate coastal infrastructure which will provide support for autonomous navigation in the future.

Keywords: ship traffic management, maritime safety, unmanned navigation, e-Navigation, a-Navigation, near collision, evasive action, group of vessels.

Acknowledgements: this research was supported by the program of academic leadership “Prioritet-2030”, project “Development of algorithms for vessel collision avoidance in accordance with COLREGs-72, assessment of their effectiveness and safety”.

For citation: Artemiev A.V., Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Petrov V.A. Collision avoidance modeling for a group of marine autonomous vessels. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1418> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011 (In Russ.).

Введение

Создание и внедрение беспилотных транспортных средств является объектом пристального внимания со стороны исследователей и инженеров [1]. К настоящему времени созданы и активно внедряются в повседневную практику все технические предпосылки для создания морских автономных надводных судов. К ним относятся системы спутниковой навигации и электронной картографии, эффективные системы связи, автоматическая идентификационная система (АИС), автоматизированные системы управления судном, современные силовые движительные установки и источники электроэнергии. Движение судна по заданной траектории является рядовой задачей [2, 3]. Активно внедряются технологии Е-Навигации как интеграции навигационных и сервисных морских инструментов [4, 5]. Создана концепция А-Навигации как пути развития безэкипажного (автономного) судовождения, подразумевающая исключение человеческого фактора за счет применения автоматического управления и организации постоянного дистанционного мониторинга и контроля [6].

В соответствии с представлениями А-Навигации используется следующее определение морского автономного надводного судна (МАНС): это судно, которое в различной степени может действовать независимо от взаимодействия с человеком. По степени автономности суда классифицируются следующим образом:

1. Судно с экипажем на борту, оснащенное системами автоматизации и поддержки принятия решений. Экипаж находится на борту судна, осуществляя управление, обслуживание судового оборудования и контроль его работы. Некоторые функции экипажа автоматизированы.

2. Дистанционно управляемое судно с экипажем на борту. Экипаж находится на

борту судна, однако судно в основном управляется удаленно, судовое оборудование обслуживается и контролируется также в основном удаленно.

3. Дистанционно управляемое судно без экипажа на борту. Судно управляется полностью удаленно, судовое оборудование обслуживается и контролируется также полностью удаленно. Экипаж на борту отсутствует.

4. Автономно функционирующее судно. Судно оснащено полностью автономной системой управления, способной автоматически контролировать работу судового оборудования, принимать решения, реализовать необходимые действия.

Данный перечень не является иерархическим, а в течение одного рейса судно может работать и в одной, и в нескольких степенях автономности.

В комплексе вопросов, связанных с обеспечением безопасной работы автономных судов, особую значимость имеет задача организации их безопасного расхождения в соответствии с международными и местными правилами. Суть проблемы в том, что действия автономного судна должны быть предсказуемы и прозрачны для экипажа обычных судов. Поэтому на первый план выходит необходимость знания при расхождении намерений встречного судна, причем это касается как автономных, так и судов с экипажем. Именно знание о том, как встречное судно намеревается маневрировать, позволяет корректно интерпретировать правила расхождения судов [7-10].

Отраслевые представления о пути решения проблемы безопасного расхождения судов связаны в настоящее время с созданием инструментария для обмена информацией о планируемых маршрутах между судами и выбора подходящего маневра. Такой обмен маршрутами позволяет оценить намерения судов заблаговременно. Если все суда будут транслировать данные о своем положении, параметрах движения и планируемом маршруте (например, посредством АИС) в общее морское информационное пространство, 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. Этот подход к управлению коллективным движением судов является принципиально новым решением, позволяющим создать систему безопасности расхождений, универсальную и приемлемую для всех судов, независимо от степени их автономности и автоматизации.

Авторы статьи вместе с коллегами имеют опыт разработки нормативов для безопасного расхождения автономных судов. В частности, в 2020 году они принимали участие в разработке «Рекомендаций по применению Международных правил предотвращения столкновения судов 1972 года (МППСС-72) автономными судами в рамках проведения эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации», а в 2022 в совещании «Экспертная группа по актуализации Рекомендаций применения МППСС-72 автономными судами». В рамках этих мероприятий был предложен математический аппарат, основанный на традиционных для судоводителей представлениях, позволяющий решать обсуждаемую здесь задачу согласованного маневрирования группы судов.

Для оценки применимости созданной математической модели необходимо провести большое число вычислительных и натуральных экспериментов, связанных с маневрированием судов различных типов в характерных ситуациях. Это даст представление о возможностях и ограничениях метода с точки зрения его внедрения в практическую деятельность, в том числе при реализации в составе соответствующих информационных сервисов. Описанию инструментов и некоторых фрагментов результатов численного моделирования задачи согласованного маневрирования группы судов и посвящена настоящая статья.

Материалы и методы

В Морском государственном университете им. адм. Г.И. Невельского имеется действующий тренажер для подготовки судоводителей, с помощью которого можно моделировать и проверять работу алгоритмов расхождения судов [11]. Тренажер включает в себя:

1. Пульт управления инструктора и пульта управления каждого из обучаемых, представляющие собой типовые персональные компьютеры, объединенные стандартной локальной компьютерной сетью. Пульта управления обучаемых могут быть объединены в группы для совместного решения конкретной задачи расхождения.

2. Подключенные к пультам управления стандартными интерфейсами (USB) управляющие устройства (джойстики, имитирующие авторулевые устройства и машинный телеграф).

3. Программное обеспечение тренажера, разработанное в среде Microsoft Visual Studio. У команды тренажера есть доступ к кодам ПО, что позволяет изменять алгоритмы маневрирования судов.

Программное обеспечение тренажера позволяет задействовать в качестве рабочего места судоводителя любые компьютеры в локальной сети. Это дает возможность ставить имитационные эксперименты с очень большим числом моделируемых судов. Движение судов происходит в соответствии с заданными в программе параметрами. На Рисунке 1 показан фрагмент пользовательского интерфейса тренажера – форма, используемая для расчета маневра судна.

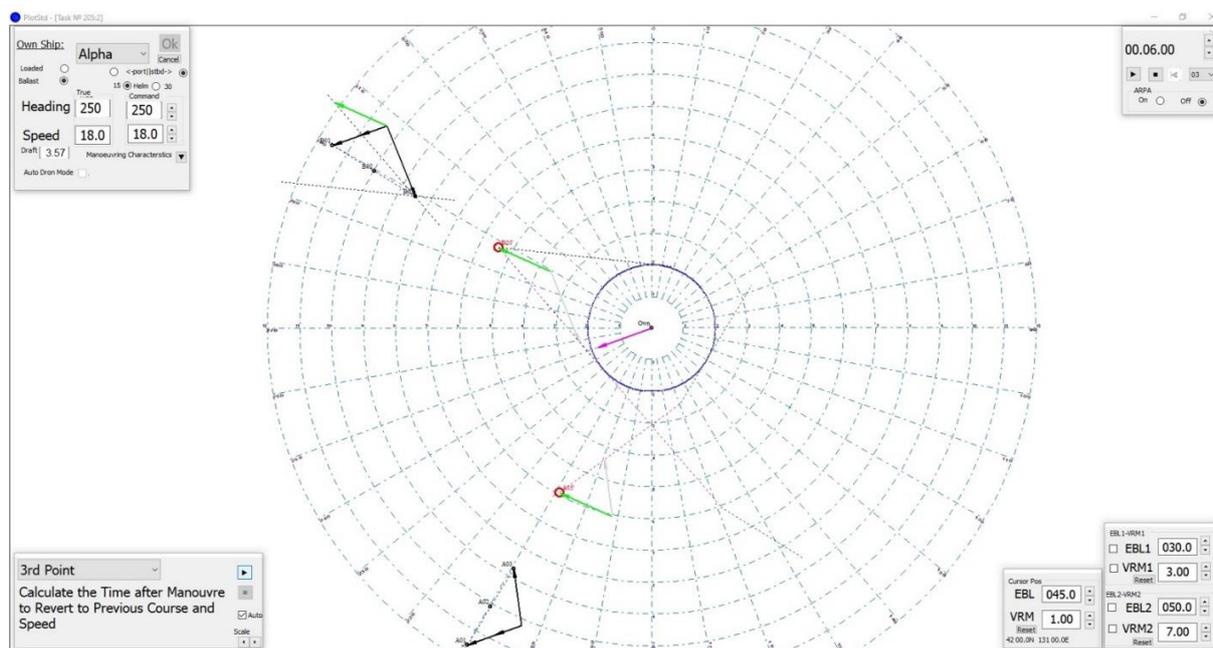


Рисунок 1 – Расчет маневра управляемого судна для безопасного расхождения при условии сохранения другими судами курса и скорости

Figure 1 – Calculation of the collision avoidance maneuver for a controlled vessel provided that other vessels maintain their course and speed

Расчет маневра для безопасного расхождения осуществляется на основе традиционных для судоводителей геометрических представлений относительного движения. Рассмотрим основные формулы. В них используется понятие косоугольного

псевдоскалярного произведения двух векторов, для которого имеется три эквивалентных способа представления:

1) $\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cdot \sin \varphi$, где φ – угол между векторами \mathbf{a} и \mathbf{b} ;

2) $\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = a_x \cdot b_y - a_y \cdot b_x$, где a_x, b_x, a_y, b_y – компоненты векторов \mathbf{a} и \mathbf{b} ;

3) $\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} = [\mathbf{a} \times \mathbf{b}]_z$, где $[\mathbf{a} \times \mathbf{b}]_z$ – z-компонента векторного произведения \mathbf{a} и \mathbf{b} в трехмерной декартовой системе координат.

При геометрических представлениях относительного движения пары судов традиционно принимается, что имеется управляемое («свое») судно и судно-цель («наблюдаемое судно»). Введем следующие величины (см. также Рисунок 2):

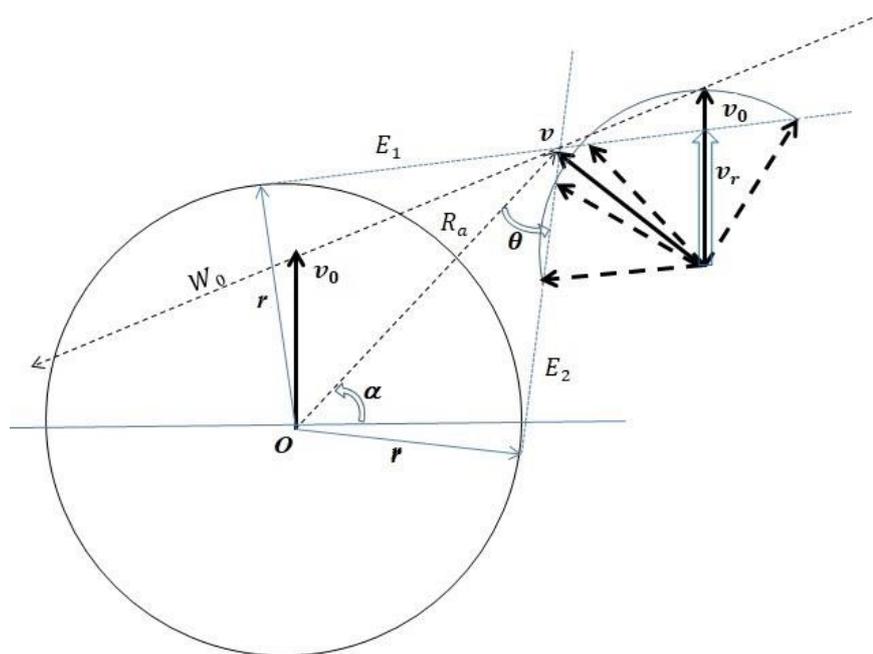


Рисунок 2 – Расчет курсов и скоростей для расхождения на заданной дистанции традиционным «геометрическим» способом

Figure 2 – Calculation of courses and speeds for collision avoidance at a given distance in the traditional "geometric" way

- 1) \mathbf{R}_1 – вектор относительного положения наблюдаемого судна в 1-й точке;
- 2) \mathbf{R}_2 – вектор относительного положения наблюдаемого судна во 2-й точке;
- 3) t_1 – время наблюдения наблюдаемого судна в 1-й точке;
- 4) t_2 – время наблюдения наблюдаемого судна во 2-й точке;
- 5) \mathbf{v}_0 – вектор скорости управляемого судна;
- 6) \mathbf{v} – вектор скорости наблюдаемого судна;
- 7) \mathbf{w} – вектор относительной скорости наблюдаемого судна.

Имеют место соотношения:

$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1}{t_2 - t_1};$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{w} + \mathbf{v}_0;$$

$$CPA = \frac{\mathbf{R}_2 \wedge \mathbf{w}}{|\mathbf{w}|},$$

$$TCPA = -\frac{\mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{w}}{w^2}.$$

CPA (closest point of approach) – это дистанция максимального сближения двух судов, TCPA (time of closest point of approach) – это время максимального сближения двух судов.

Считается, что управляемое судно находится в центре круга радиуса r , задающего допустимую дистанцию сближения (Рисунок 2). На Рисунке 2 показаны:

1) \mathbf{W}_0 – вектор относительного движения цели без предполагаемого маневра;
2) \mathbf{R}_a – вектор относительного положения цели в момент начала предполагаемого маневра;

3) r – допустимая дистанция сближения.

4) $\theta = \arcsin\left(\frac{r}{|\mathbf{R}_a|}\right)$ – угол треугольника;

5) α – угол наклона вектора \mathbf{R}_a ;

6) $a = \sqrt{|\mathbf{R}_a|^2 - r^2}$ – длина векторов \mathbf{E}_1 и \mathbf{E}_2 , касательных к окружности;

7) $\mathbf{E}_1 = -(a \cdot \sin(-\theta), a \cdot \cos(-\theta))$ – первый вектор, касательный к окружности;

8) $\mathbf{E}_2 = -(a \cdot \sin(+\theta), a \cdot \cos(+\theta))$ – второй вектор, касательный к окружности.

Схема, показанная на Рисунке 2, получила в отраслевой науке и практике название «область маневра» (room-of-maneuver) [12, 13]. Она может иметь различную модельную интерпретацию, в том числе на основе нечеткой логики [14]. В зависимости от контекста рассматриваемого сценария для безопасного расхождения нужно выбрать поворот управляемого судна вправо или влево (обычно выбирается поворот вправо). Новый курс управляемого судна рассчитывается следующим образом. Пусть \mathbf{E} – вектор, касательный к окружности (\mathbf{E}_1 , или \mathbf{E}_2), выбранный в зависимости от направления поворота, γ – угол наклона вектора \mathbf{E} . Тогда будем иметь два возможных значения курса безопасного расхождения: $\gamma + \beta$ и $\gamma - \beta$, где:

$$\beta = \arccos\left(\frac{d}{|\mathbf{v}_0|}\right),$$

$$d = \frac{\mathbf{E} \wedge \mathbf{v}}{|\mathbf{E}|}.$$

Второе возможное значение вектора \mathbf{E} даст еще два значения курса. Таким образом, для решения задачи расхождения пары судов имеется четыре возможных значения курса управляемого судна. Следует иметь в виду, что некоторые из них могут не иметь практического смысла (например, когда скалярное произведение векторов относительной скорости до и после предполагаемого маневра меньше нуля).

Если предполагается маневр управляемого судна только скоростью, то новая скорость находится по формуле:

$$v_r = |\mathbf{v}_0| \frac{\mathbf{v} \wedge \mathbf{E}}{\mathbf{v}_0 \wedge \mathbf{E}}.$$

В данном случае тоже получатся два решения в зависимости от выбора вектора \mathbf{E} , касательного к окружности (\mathbf{E}_1 , или \mathbf{E}_2). Здесь следует выбирать решения, имеющие практический смысл: если $v_r > |\mathbf{v}_0|$, то это означает, что скорость надо увеличивать, а это не всегда возможно. Если же требуемая скорость окажется отрицательной, то задний ход судно тоже скорее всего давать не будет.

Использование средств автоматизации дает возможность реализовать как на традиционном, так и на автономном судне более безопасный подход – заблаговременное маневрирование. При таком маневре заранее определено, что управляемое судно в некоторый момент времени (определяемый пороговым значением TCPA) предпринимает поворот вправо на 60 градусов (или поворот на заданный угол со

снижением скорости до заданной). Судно движется с измененным курсом или (и) скоростью до того момента, при котором возврат к прежнему курсу и скорости позволит разойтись на дистанции не менее заданной. После расхождения судно возвращается на прежний путь.

Необходимость ранней отдачи команд может быть обусловлена и ограничениями маневренных характеристик судна. Для маневра курсом время упреждения начала маневра:

$$t_{adv} = t_{lin} + 0.8 \cdot t_{\theta},$$

где:

- 1) t_{adv} – время упреждения начала маневра;
- 2) t_{lin} – время задержки начала поворота, пока судно движется по (условно)-линейному участку в начале циркуляции;
- 3) t_{θ} – время поворота на заданный угол θ в соответствии с маневренными характеристиками.

Для маневра скоростью время упреждения начала маневра:

$$t_{adv} = 0.2 \cdot t_{red},$$

где t_{red} – время снижения скорости от исходной до расчетной в соответствии с маневренными характеристиками.

Формулы для времени упреждения являются эмпирическими, приближительными, но при условии заблаговременности маневра и с учетом влияния всяких прочих факторов неопределенности их точность может считаться удовлетворительной.

Расширение описанной методики на случай совместного маневрирования группы (традиционных или автономных) судов состоит в реализации следующего алгоритма:

1. Группа судов рассматривается как множество пар «судно-судно». Определяется наиболее опасная пара судов (та, где значение СРА минимально и ТСРА менее установленного значения).
2. Определяются параметры маневрирования для самой опасной пары судов.
3. Определяется самая опасная пара судов с учетом измененных значений скорости и курса первой опасной пары. Если в новой паре присутствует одно из судов уже рассмотренной пары, то маневрирует второе (вновь обнаруженное опасным) судно пары.
4. Шаг 3 итерационно повторяется. Если последовательность вычислений приводит к невозможности выполнения маневра для безопасного расхождения, то все маневры аннулируются и рассмотрение снова начинается с самой первой опасной пары, но уже с альтернативным маневром.

Результаты

При работе над методикой согласованного маневрирования группы судов было проведено большое число вычислительных экспериментов, связанных с моделированием типичных ситуаций с различным числом судов в группе. Ниже показан один из результатов такого моделирования на описанном выше тренажере для подготовки судоводителей. Рассматривается случайным образом сгенерированная ситуация сближения семи судов. Программа находит, что для безопасного расхождения всех достаточно сманеврировать всего двум судам. На Рисунке 3 показаны моделируемые траектории судов, два из которых совершают маневр и возвращаются на прежний курс.

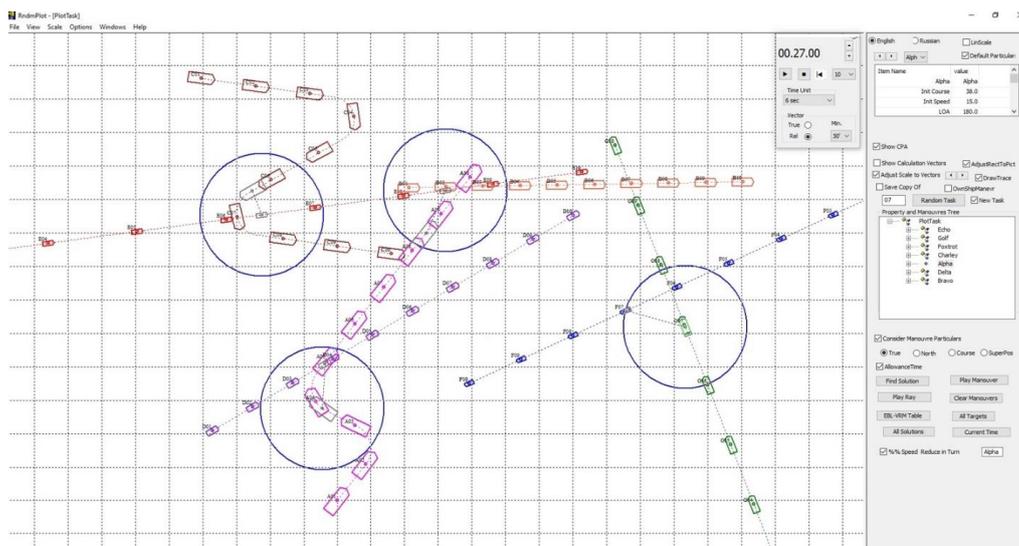


Рисунок 3 – Результат расчета согласованных маневров расхождения группы судов в истинном движении

Figure 3 – Result of calculating coordinated collision avoidance maneuvers of a group of ships in a true motion

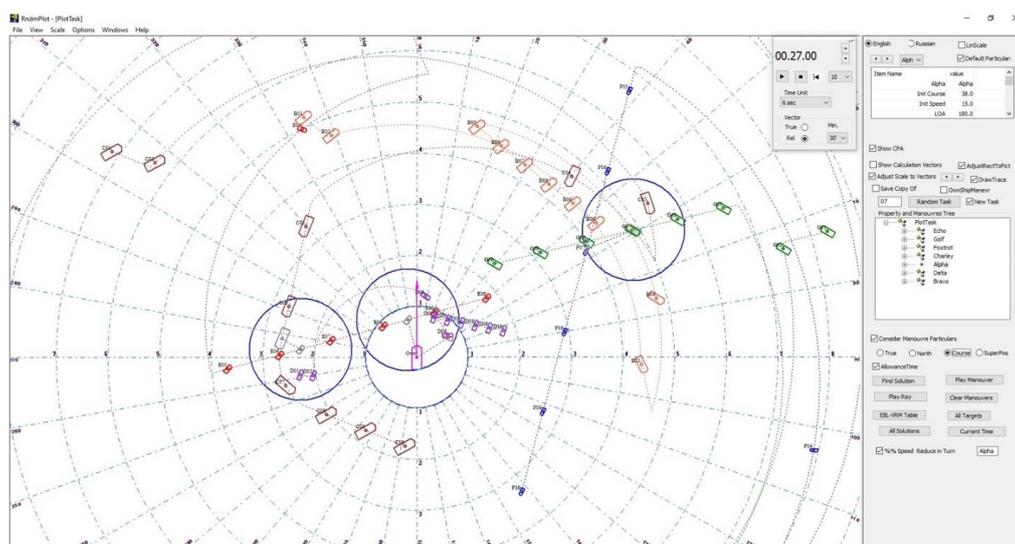


Рисунок 4 – Результат расчета согласованных маневров расхождения группы судов в относительном движении (ориентация по курсу)

Figure 4 – Result of calculating coordinated collision avoidance maneuvers of a group of ships in a relative motion (heading orientation)

На Рисунке 4 показана та же самая моделируемая ситуация с точки зрения относительного движения вокруг управляемого («центрального») судна (имеет сиреневый цвет на Рисунке 3). Эта та картина группового движения, которую «видит» судоводитель, находящийся на борту управляемого судна. Заметно, что остальные суда группы при движении не допускают опасного сближения с управляемым судном: суда хоть и заходят в круг в центре схемы, но проходят на достаточном расстоянии.

На Рисунке 5 показан результат «наложения» представлений в относительном движении для всех семи движущихся судов. На нем отчетливо видна свободная от других судов «зона безопасности», что означает, что все суда в результате согласованного маневра благополучно разошлись.

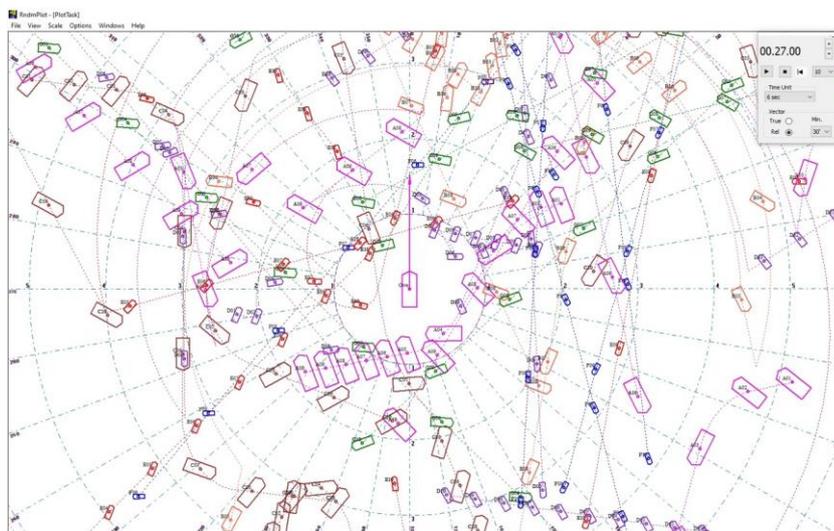


Рисунок 5 – Результат расчета согласованных маневров расхождения группы судов, представленный в относительном движении (ориентация по курсу): наложение изображений со всех судов

Figure 5 – Result of calculating coordinated collision avoidance maneuvers of a group of ships presented in a relative motion (heading orientation): overlay of images from all ships

На Рисунке 6 показано наложение изображений моделируемой навигационной ситуации в ориентации по курсу для всех судов без маневров. Видно, что если совершается маневр уклонения, то несколько судов пересекают центр, что означает их столкновение, и еще несколько проходят в опасной близости.

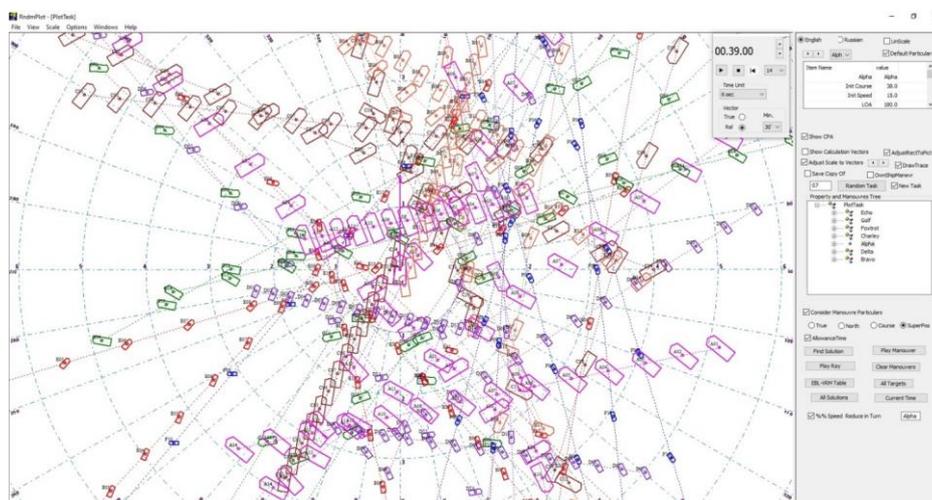


Рисунок 6 – Моделирование движения группы судов, представленное в относительном движении без маневрирования (ориентация по курсу): наложение изображений со всех судов

Figure 6 – Simulation of the traffic of a group of ships presented in a relative motion without maneuvering (heading orientation): overlay of images from all ships

В целом, по результатам проведения вычислительных экспериментов, можно сделать вывод о хорошей работе предлагаемого алгоритма совместного маневрирования группы судов и возможности применения его на практике.

Обсуждение

Автоматизация группового маневрирования судов в процессе расхождения в открытом море и в ограниченных водах является одной из самых актуальных задач как в классическом, так и в автономном судовождении [15, 16]. Ее решение состоит из следующих этапов:

- 1) разработка математической модели процесса расхождения судов и соответствующих алгоритмов;
- 2) моделирование расхождения судов на компьютерном симуляторе;
- 3) натурные испытания работы алгоритмов расхождения с использованием моделей морских автономных надводных судов.

Рассматриваемая в работе математическая модель задачи основана на геометрическом представлении относительного движения двух судов – «области маневра». Это классическое решение используется во многих задачах, связанных с расхождением судов и пригодно как для пар «судно-судно», так и для группового движения судов. Так, в работе [12] этот способ представления опасных и безопасных скоростей и курсов управляемого судна используется для индикации и принятия решения судоводителем: судно может изменить курс и / или скорость таким образом, чтобы его сближение с другим судном было безопасным (величина CPA была больше критического значения). В работе [13] этот способ используется для автоматизации управления судном: вычислительное устройство выбирает необходимое изменение курса и скорости управляемого судна для совершения маневра безопасного расхождения. В статье [14] авторами предлагается нечеткая интерпретация задачи безопасного расхождения судов. Величины CPA, TCPA и направление вектора относительной скорости управляемого судна представляются нечеткими переменными с несколькими термами. Система правил машины нечеткого вывода интерпретирует то или иное сочетание термов как ситуацию различной степени опасности, что позволяет упорядочить диспетчеризацию судов при высокой интенсивности движения на акватории. Для оценки степени опасности ситуации возможно использовать машину нечеткого вывода Мамдани или Сугено. Идея разделения степени опасности ситуации при сближении судов и расширение подхода «области маневра» на случай группового движения судов рассматривается в работе [17].

Этап натурных испытаний необходим для подтверждения работоспособности алгоритмов маневрирования в специфических условиях эксплуатации морских судов (ветер, волнение, погрешности движения, сбой в работе бортового оборудования и т. п.). Для проведения натурных морских испытаний предполагается использовать специально разработанную модель судна. Имеются следующие основные мотивы при выборе типа такой модели:

1. В районе предполагаемого проведения натурных экспериментов (залив Петра Великого) в период с мая по сентябрь возможно волнение до 1 метра с вероятностью 90 %. При планировании морских испытаний будет учтен предварительный прогноз, и выбраны периоды с волнением менее 0,5 метра, но модель не должна терять остойчивость и управляемость и при волнении 1 метр.

2. Модель должна иметь грузоподъемность 150–200 кг (аккумуляторные батареи или бензиновый электрогенератор, навигационное оборудование и средства связи, бортовой компьютер со своей периферией и др.).

3. Модель судна должна быть разборной для компактного хранения и перевозки легковым транспортом, ремонтпригодной в морских условиях.

На основании этих требований можно считать, что подходящим типом судна может быть катамаран на основе надувных понтонов (поплавков). К числу позитивных

факторов такого катамарана можно отнести малые углы крена на циркуляции, высокую начальную остойчивость и непотопляемость при повреждении корпуса. Надувные понтоны типовых размеров серийно производятся в России, и есть возможность их изготовления на заказ по чертежам заказчика. На Рисунке 7 показан вариант возможной компоновки такого катамарана.



Рисунок 7 – Возможная компоновка катамарана для проведения натурных морских испытаний алгоритмов расхождения

Figure 7 – Layout of a catamaran for full-scale sea testing of collision avoidance algorithms

За основу для перспективного внедрения алгоритмов и способов расхождения судов с использованием общего морского информационного пространства можно взять уже действующие системы: так, АИС уже работает более 20 лет, и накоплен достаточно большой опыт ее использования.

Для применения описанного метода расхождения судов на практике потребуются решение ряда правовых вопросов, связанных с ответственностью каждого участника процесса расхождения в соответствии с правилами МППСС.

Заключение

Работа посвящена задаче расхождения группы морских автономных надводных судов. Предложенный метод решения задачи основан на геометрическом представлении относительного движения судов группы с учетом их текущих и планируемых после завершения маневра скоростей и курсов.

Суть предлагаемого подхода состоит в реализации совместного маневрирования группы участников движения, что позволяет корректно интерпретировать традиционные правила расхождения для безэкипажных надводных судов. Для этого предлагается организовать обмен информацией о планируемых маршрутах между судами, что позволит оценить намерения судов заблаговременно. Суда транслируют данные о своем положении, параметрах движения и планируемом маршруте в общий информационный сервис, и на каждом судне принимается решение о маневрировании, приемлемое для всей группы судов. Такой подход позволяет обеспечить безопасное расхождение судов независимо от степени их автономности и автоматизации.

В работе приведены модельные примеры безопасного расхождения группы судов. Результаты моделирования подтверждают применимость предложенных идей. Даются рекомендации по постановке натурных экспериментов, позволяющих оценить перспективы дальнейшего практического внедрения предлагаемого метода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Франк М.О., Овчинников К.Д., Рыжов В.А. Обзор российского и зарубежного опыта создания безэкипажных катеров. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022;57(3-1):22–28. DOI: 10.37220/МИТ.2022.57.3.002.
2. Коренев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна. *Морские интеллектуальные технологии*. 2021;54(4-1):158–165. DOI: 10.37220/МИТ.2021.54.4.047.
3. Дыда А.А., Пушкарев И.И., Чумакова К.Н. Алгоритм обхода статических препятствий для безэкипажного судна. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2021;13(3):307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.
4. Ардельянов Н.П. Промежуточные результаты концепции е-навигации. *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова*. 2022;39(2):8–11.
5. Ривкин Б.С. Е-навигация. Прошло 5 лет. *Гироскопия и навигация*. 2020;28(1):101–120. DOI: 10.17285/0869-7035.0026.
6. Сайт проекта А-навигации [Электронный ресурс]. URL: <https://www.a-nav.org/ru/index.html> (дата обращения: 13.06.2023).
7. Szlapczynski R., Szlapczynska J. Evolutionary Sets of Safe Ship Trajectories: Evaluation of Individuals. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2012;6(3):345–353.
8. Zhang K., Huang L., He Y., Zhang L., Huang W., Xie C., Hao G. Collision Avoidance Method for Autonomous Ships Based on Modified Velocity Obstacle and Collision Risk Index. *Journal of Advanced Transportation*. 2022;2022:1–22. DOI: 10.1155/2022/1534815.
9. Kang Y.T., Chen W.J., Zhu D.Q., Wang J.H. Collision avoidance path planning in multi-ship encounter situations. *Journal of Marine Science and Technology*. 2021;26:1026–1037. DOI: 10.1007/s00773-021-00796-z.
10. Гриняк В.М., Шуленина А.В. Оценка загруженности трафика морской акватории мерой возможности принятия решений судоводителями. *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. 2019;11(3):140–152. DOI: 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-3/140-152.
11. Петров В. А., Шарлай Г. Н., Пузачев А. Н. Тренажерный комплекс для подготовки судоводителей / Патент на изобретение № 2657708: заявл. 17.04.2017: опубл. 14.06.2018.
12. Degre T., Lefevre X. A collision avoidance system. *Journal of Navigation*. 1981;34:294–302.
13. Petersen E., Inoue K., Tsugane M. Simulator studies on a collision avoidance display that facilitates efficient and precise assessment of evasive manoeuvres in congested waterways. *Journal of Navigation*. 2003;56:411–427.
14. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Нечеткая система предупреждения об опасном сближении морских судов. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2016;(2):93. DOI: 10.7868/S0002338816010078.
15. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Трофимов М.В. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна. *Морские интеллектуальные технологии*. 2016;33(3-1):269–273.
16. Гриняк В.М., Трофимов М.В., Люлько В.И. Оценка и представление параметров безопасного движения судна. *Вестник государственного университета морского и*

речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016;38(4):51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.

17. Szlapczynski R., Szlapczynska J. A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions. *Journal of Navigation*. 2015;68(6):1041–1055. DOI:10.1017/S0373463315000296.

REFERENCES

1. Frank M.O., Ovchinnikov K.D., Ryzhov V.A. Review of Russian and foreign experience of marine unmanned surface vehicles development. *Morskie intelektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*. 2022;57(3-1):22–28. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.002. (In Russ.).
2. Korenev A.S., Khabarov S.P., Shpectorov A.G. A route calculation for unmanned vessel. *Morskie intelektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*. 2021;54(4-1):158–165. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.047. (In Russ.).
3. Dyda A.A., Pushkarev I.I., Chumakova K.N. Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2021;13(3):307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315. (In Russ.).
4. Ardelyanov N.P. Intermediate results of the e-navigation concept. *Vestnik Gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F.F. Ushakova*. 2022;39(2):8–11. (In Russ.).
5. Rivkin B.S. e-Navigation: five years later. *Gyroscopy and Navigation*. 2020;28(1):101–120. DOI: 10.17285/0869-7035.0026.
6. Cite of A-navigation project [website]. URL: <https://www.a-nav.org/ru/index.html> (accessed on 13.06.2023).
7. Szlapczynski R., Szlapczynska J. Evolutionary sets of safe ship trajectories: evaluation of individuals. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2012;(3):345–353.
8. Zhang K., Huang L., He Y., Zhang L., Huang W., Xie C., Hao G. Collision avoidance method for autonomous ships based on modified velocity obstacle and collision risk index. *Journal of Advanced Transportation*. 2022;2022:1–22.
9. Kang Y.T., Chen W.J., Zhu D.Q., Wang J.H. Collision avoidance path planning in multi-ship encounter situations. *Journal of Marine Science and Technology*. 2021;26:1026–1037.
10. Grinyak V.M., Shilenina A.V. Marine traffic safety estimation by emotional load on a navigator metric. *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa = The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2019;(3):140–152. (In Russ.).
11. Petrov V.A, Sharlay G.N., Puzachev A.N. Simulator complex for ship driver training. Patent RU 2657708 C1: Date of filing: 17.04.2017: Date of publication: 14.06.2018. (In Russ.).
12. Degre T., Lefevre X. A collision avoidance system. *Journal of Navigation*. 1981;34:294–302.
13. Petersen E., Inoue K., Tsugane M. Simulator studies on a collision avoidance display that facilitates efficient and precise assessment of evasive manoeuvres in congested waterways. *Journal of Navigation*. 2003;56:411–427.

14. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S. Fuzzy collision avoidance system for ships. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya = Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2016;55(2):249–259. (In Russ.).
15. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Trofimov M.V. Data visualization of ship collision avoidance system. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intellectual Technologies*. 2016;33(3-1):269–273. (In Russ.).
16. Grinyak V.M., Trofimov M.V., Lulko V.I. Data visualization of ship collision avoidance system. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*. 2016;(4):51–61. (In Russ.).
17. Szlaczynski R., Szlaczynska J. A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions. *Journal of Navigation*. 2015;68(6):1041–1055.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Артемьев Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра судовождения, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация.
e-mail: artemyev@msun.ru

Andrey Vladimirovich Artemiev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, the Russian Federation.

Гриняк Виктор Михайлович, доктор технических наук, доцент, кафедра Информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет, Владивосток, Российская Федерация.
e-mail: victor.grinyak@gmail.com
Scopus Author ID: [7801667666](https://orcid.org/0009-0001-7801-6676)

Victor Mikhailovich Grinyak, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Information Technologies and Systems Department, Vladivostok State University, Vladivostok, the Russian Federation.

Девятисильный Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, сектор Управления и навигации, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Российская Федерация.
e-mail: devyatis@dvo.ru

Aleksandr Sergeevich Devyatisilnyi, Doctor of Technical Sciences, Professor, Navigation and Control Department, Institute of Automation and Control Processes FEBRAS, Vladivostok, the Russian Federation.

Петров Владимир Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра судовождения, Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация.
e-mail: petrov@msun.ru

Vladimir Alekseevich Petrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Navigation, Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 27.06.2023; одобрена после рецензирования 21.07.2023; принята к публикации 08.08.2023.

The article was submitted 27.06.2023; approved after reviewing 21.07.2023; accepted for publication 08.08.2023.