

Научная статья
УДК 519.68:15:681.5
DOI: <https://doi.org/10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119>

Численное исследование задачи безопасного расхождения групп морских автономных надводных судов

Артемьев Андрей Владимирович

Петров Владимир Алексеевич

Морской государственный университет им. Г.И. Невельского
Владивосток. Россия

Гриняк Виктор Михайлович

Владивостокский государственный университет
Владивосток. Россия

Аннотация. Статья посвящена проблеме обеспечения навигационной безопасности движения судов. Рассматривается задача безопасного расхождения судов на акваториях с интенсивным трафиком. Предлагается традиционная для судовождения геометрическая интерпретация этой задачи, когда рассматривается относительное движение пары судов. При этом определяется геометрическое место точек вектора скорости управляемого судна, соответствующее опасным и безопасным скоростям и курсам. В работе отмечается особый характер движения автономных надводных судов, что накладывает ряд ограничений на использование известных методов безопасного расхождения и делает актуальным переход от моделирования движения пар «судно-судно» к моделированию движения типа «судно-группа судов». Указано, что в случае группового движения действия автономного судна должны быть предсказуемы и прозрачны для экипажа обычных судов. Поэтому участникам движения, как автономным, так и с экипажем, при решении задачи безопасного расхождения необходимо знать намерения встречного судна. Именно знание того, как встречное судно намеревается маневрировать, позволяет корректно выбрать собственное движение, избежать попадания в сложные ситуации («навигационные ловушки»). В статье предлагается новый подход выбора параметров возможного маневра судов – с учетом возможных намерений других участников движения. Это позволяет корректно интерпретировать существующие правила расхождения для морских автономных надводных судов. Обсуждается возможный инструментарий для обмена информацией о планируемых маршрутах между судами и выбора подходящего маневра. Такой обмен маршрутами позволяет оценить намерения судов заблаговременно и принять решение о маневрировании, приемлемое для всей группы судов, участвующих в расхождении. Работа сопровождается примерами расчетов параметров маневрирования группы судов, демонстрирующих применимость описанного метода. Описано программное обеспечение, использованное для моделирования движения групп судов и численного исследования рассматриваемой задачи. Даются рекомендации по постановке натурных экспериментов.

© Артемьев А.В., 2023

© Петров В.А., 2023

© Гриняк В.М., 2023

104

Ключевые слова: управление движением судов, безэкипажное судоходство, e-навигация, a-навигация, опасное сближение, манёвр уклонения, коллективное движение.

Для цитирования: Артемьев А.В., Петров В.А., Гриняк В.М. Численное исследование задачи безопасного расхождения групп морских автономных надводных судов // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета. 2023. Т. 15, № 3. С. 104–119. DOI: <https://doi.org/10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119>.

.....

Technical sciences

.....

Original article

Numerical modelling of collision avoidance for marine autonomous vessels

Andrey V. Artemyev

Vladimir A. Petrov

Maritime State University named after G.I. Nevelskoy
Vladivostok, Russia

Victor M. Grinyak

Vladivostok State University
Vladivostok, Russia

Abstract. The paper is devoted to the problem of ensuring maritime traffic safety. The problem of safe passage of ships in water areas with heavy traffic is considered. A geometric interpretation of this problem is proposed when the relative motion of a pair of ships is considered. In this case, the locus of points of the speed vector of the controlled vessel is determined, corresponding to dangerous and safe speeds and courses. The paper emphasizes the special nature of the movement of autonomous surface vessels, which imposes a number of restrictions on the use of known methods of safe divergence and makes the transition from modeling the movement of pairs "ship-ship" to modeling the movement of the type "ship-group of ships" relevant. It is indicated that in the case of a group movement, the actions of an autonomous vessel must be predictable and transparent to the crew of conventional vessels. Therefore, when solving the problem of safe divergence, crews of both autonomous craft and conventional ships need to know the intentions of the oncoming vessel. It is the knowledge of how the oncoming ship intends to maneuver that allows you to correctly choose your own movement and avoid getting into difficult situations ("navigation traps"). The paper proposes a new approach to choosing the parameters of a possible vessel maneuver that takes into account the possible intentions of other ships in the movement. This makes it possible to accurately interpret the existing passing rules for maritime autonomous surface vessels. Possible tools for the exchange of information on planned routes between ships and the choice of an appropriate maneuver are discussed. Such an exchange of routes makes it possible to assess the intentions of ships in advance and make a decision on maneuvering that is acceptable to the entire group of ships that navigate in high density waters. The work is accompanied by examples of calculating the maneuvering parameters of a group of ships, which demonstrate the applicability of the described method. The software used to simulate the movement of groups of ships and the numerical study of the problem under consideration are described. Recommendations are given for setting up full-scale experiments.

Keywords: maritime safety, unmanned navigation, e-navigation, a-navigation, risk assessment, collision avoidance.

For citation: Artemyev A.V., Petrov V.A., Grinyak V.M. Numerical modelling of collision avoidance for marine autonomous vessels // The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University. 2023. Vol. 15, № 3. P. 104–119. DOI: <https://doi.org/10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119>.

Введение

Создание и внедрение беспилотных транспортных средств являются объектами пристального внимания со стороны исследователей и инженеров [1–8]. В настоящее время созданы и активно внедряются в повседневную практику все технические предпосылки для создания морских автономных надводных судов [9, 10]. 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 [11]. Движение судна по заданной траектории является рядовой задачей [12–14]. Активно внедряются технологии е-навигации как интеграции навигационных и сервисных морских инструментов [15, 16]. Создана концепция а-навигации как путь развития безэкипажного (автономного) судовождения, подразумевающая исключение человеческого фактора за счет применения автоматического управления и организации постоянного дистанционного мониторинга и контроля [17].

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:

- судно с экипажем на борту, оснащённое системами автоматизации и поддержки принятия решений. Экипаж находится на борту судна, осуществляя управление, обслуживание судового оборудования и контроль его работы. Некоторые функции экипажа автоматизированы;
- дистанционно управляемое судно с экипажем на борту. Экипаж находится на борту судна, однако судно в основном управляется удалённо; судовое оборудование в основном обслуживается и контролируется также удалённо.
- дистанционно управляемое судно без экипажа на борту. Судно управляется полностью удалённо; судовое оборудование обслуживается и контролируется также полностью удалённо. Экипаж на борту отсутствует;
- автономно функционирующее судно. Судно оснащено полностью автономной системой управления, способной автоматически контролировать работу судового оборудования, принимать решения, реализовывать необходимые действия.

Данный перечень не является иерархическим: 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 обеспечения их безопасного расхождения в соответствии с международными и местными правилами. Суть проблемы заключается 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 того, как встречное судно намеревается маневрировать, позволяет корректно выбрать собственное движение и верно интерпретировать правила расхождения судов [18–20].

Отраслевые представления о пути решения проблемы безопасного расхождения судов связаны в настоящее время с созданием инструментария для обмена информа-

цией о планируемых маршрутах между судами и выбора подходящего маневра. Такой обмен маршрутами позволяет оценить намерения судов заблаговременно. Если все суда будут транслировать данные о своём 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 г. они принимали участие в разработке «Рекомендаций по применению Международных правил предотвращения столкновения судов 1972 года (МППСС-72) с автономными судами в рамках проведения эксперимента по опытной эксплуатации автономных судов под Государственным флагом Российской Федерации», а в 2022 г. 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.

Основная часть

Рассмотрим инструменты и некоторые фрагменты результатов численного моделирования задачи согласованного маневрирования группы судов.

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 [21]. Тренажер включает в себя:

- 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;
- подключенные к пультам управления стандартными интерфейсами (USB) управляющие устройства (джойстики, имитирующие авторулевые устройства и машинный телеграф);
- программное обеспечение (ПО) тренажёра, разработанное в среде Microsoft Visual Studio. У команды тренажёра 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 даёт возможность ставить имитационные эксперименты с очень большим числом моделируемых судов. Движение судов происходит в соответствии с заданными в программе параметрами. На рисунках 1 и 2 показаны фрагменты пользовательского интерфейса тренажера – рабочее место судоводителя (см. рис. 1) и форма, используемая для расчета маневра судна (см. рис. 2).

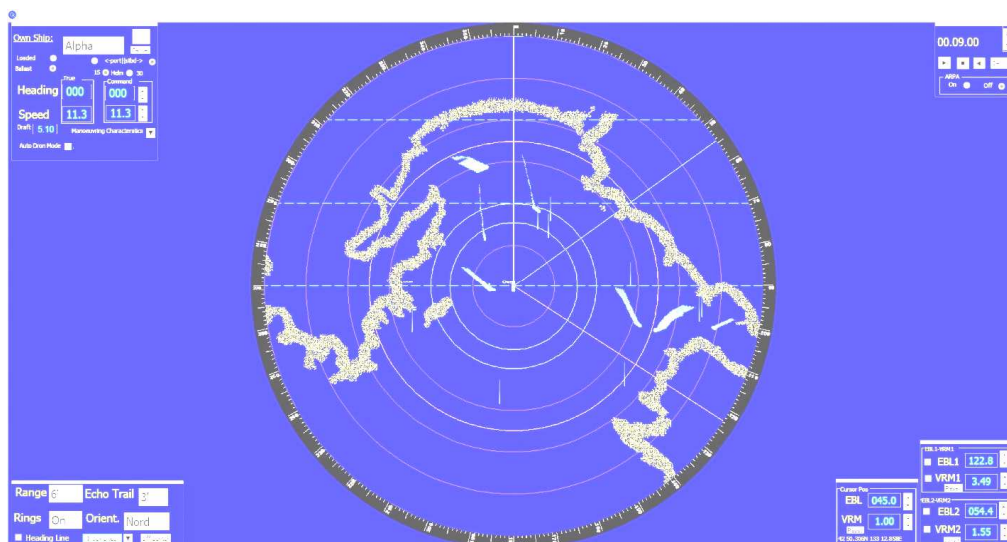


Рис. 1. Рабочее место судоводителя

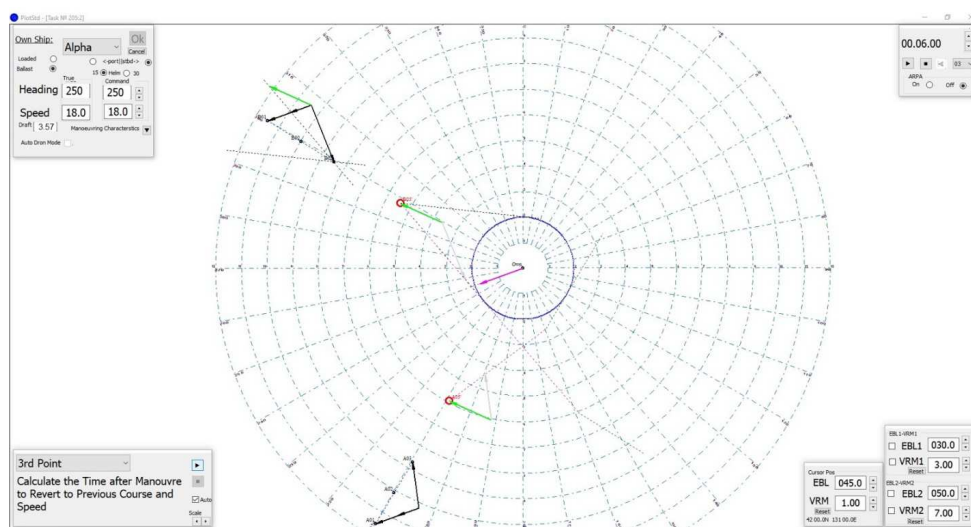


Рис. 2. Стандартная процедура расчёта манёвра управляемого судна для безопасного расхождения при условии сохранения другими судами курса и скорости

Расчет маневра для безопасного расхождения осуществляется на основе традиционных для судоводителей геометрических представлений относительного движения. На рисунке 3 показана идея модели относительного движения двух сближающихся судов.

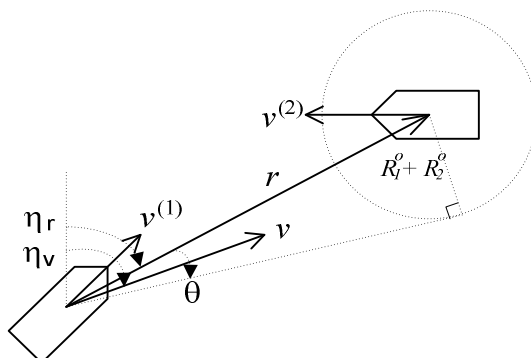


Рис. 3. Модель относительного движения двух судов

Здесь $v^{(1)}$ и $v^{(2)}$ – векторы скорости движения первого и второго судна; $v = v^{(1)} - v^{(2)}$ – вектор скорости относительного движения (сближения) судов; r – вектор относительного положения судов; η_v и η_r – направление векторов относительной скорости и относительного положения судов; R_1^0 и R_2^0 – радиусы окружностей, условно очерченных вокруг каждого судна, определяющих зону, в которую не допускается вторжение других судов; θ – угол, определяемый расстоянием между судами и величинами R_1^0 и R_2^0 . Считается, что суда сближаются опасно, если

$$|\eta_v - \eta_r| < \theta,$$

$$0 < T < T^*,$$

где T – время, оставшееся до максимального сближения судов (или ТСПА – time of closest point of approach); T^* – пороговое значение времени ТСПА.

В практике судовождения также широко используется величина СПА (closest point of approach) – дистанция максимального сближения судов. Таким образом, первое условие опасного сближения соответствует предполагаемому сближению судов на расстояние меньше максимально возможного СПА; второе условие формализует случай, когда время максимального сближения судов ТСПА меньше допустимого.

Первое судно считается управляемым, второе – наблюдаемым (судном-препятствием или судном-целью). Осуществляя параллельный перенос схемы рис. 3 на вектор $v^{(2)}$, получим геометрическое представление множества значений вектора $v^{(1)}$, соответствующих опасным и безопасным значениям скорости и курса первого судна (рис. 4).

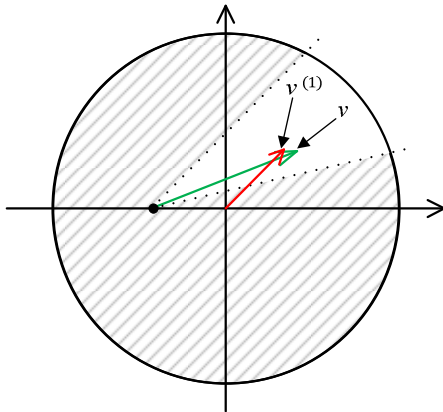


Рис. 4. Идея построения множества опасных и безопасных значений скорости и курса судна

чтобы конец вектора $v^{(1)}$ переместился в безопасную (заштрихованную) зону. Схема, показанная на рис. 4, получила в отраслевой науке и практике название «область манёвра» (room-of-maneuver) [23–25].

Использование средств автоматизации даёт 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 ТСПА) предпринимает поворот вправо на 60° (или поворот на заданный угол со снижением скорости до заданной). Судно движется с измененным курсом и (или) 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 составит

$$t_{adv} = t_{lin} + 0,8 \cdot t_{\theta},$$

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

Для маневра скоростью время упреждения начала маневра составит

$$t_{adv} = 0,2 \cdot t_{red},$$

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

Рисунок 4 соответствует случаю, изображённому на рис. 3. Зелёным на рис. 4 показан вектор скорости относительного движения судов v , красным – вектор скорости первого судна $v^{(1)}$. Линия окружности соответствует максимально возможной скорости первого судна. Заштрихованная область – это безопасные значения скоростей и курсов первого судна (т.е. возможные значения вектора $v^{(1)}$), белый сектор – курс и скорость первого судна, ведущие к опасному сближению с судном-целью. Для того чтобы двигаться безопасно, первому судну нужно совершить манёвр курсом и (или) скоростью так,

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 изменённых 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.

Следующий шаг итерационно повторяется. Если последовательность вычислений приводит к невозможности выполнения маневра для безопасного расхождения, то все маневры аннулируются и рассмотрение группы судов 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 тренажёре для подготовки судоводителей. Рассматривается случайным образом сгенерированная ситуация сближения семи судов. Программа находит, что для безопасного расхождения всех судов достаточно сманеврировать всего двум судам. На рисунке 5 показаны моделируемые траектории судов, два из которых совершают маневр и возвращаются на прежний курс.

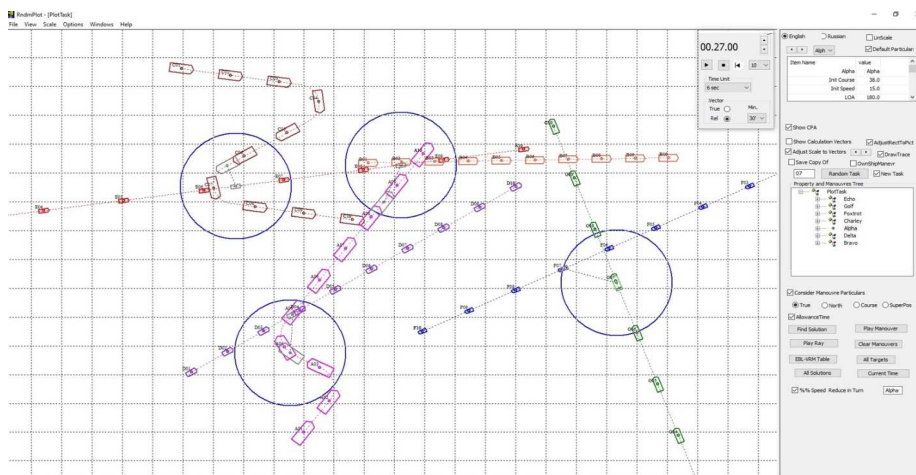


Рис. 5. Результат расчета согласованных маневров расхождения группы судов в истинном движении

На рисунке 6 показана та же самая моделируемая ситуация с точки зрения относительного движения вокруг управляемого (центрального) судна (имеет сиреневый цвет на рис. 5). Эта та картина группового движения, которую наблюдает судоводитель, находящийся на борту управляемого судна. Видно, 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.

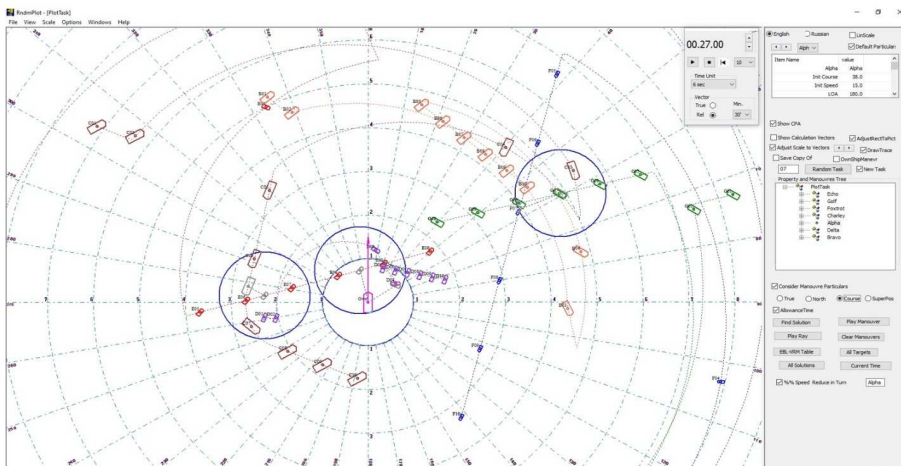


Рис. 6. Результат расчета согласованных маневров расхождения группы судов в относительном движении (ориентация по курсу)

На рисунке 7 показан результат наложения представлений в относительном движении для всех семи движущихся судов. На нем отчетливо видна свободная от других судов зона безопасности, означающая, что все суда в результате согласованного маневра благополучно разошлись.

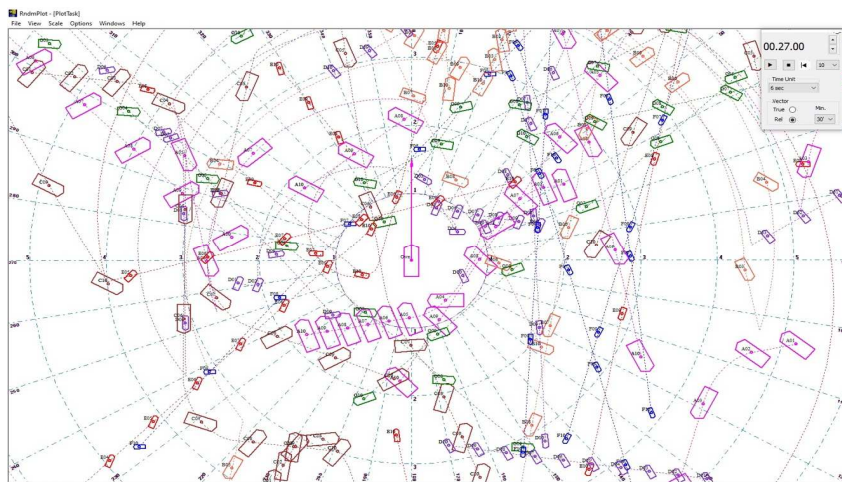


Рис. 7. Результат расчета согласованных маневров расхождения группы судов, представленный в относительном движении (ориентация по курсу): наложение изображений со всех судов

На рисунке 8 показано наложение изображений моделируемой навигационной ситуации в ориентации по курсу для всех судов без маневров. Видно, что, если совершается манёвр уклонения, несколько судов пересекают центр (что означает их столкновение) и еще несколько проходят в опасной близости.

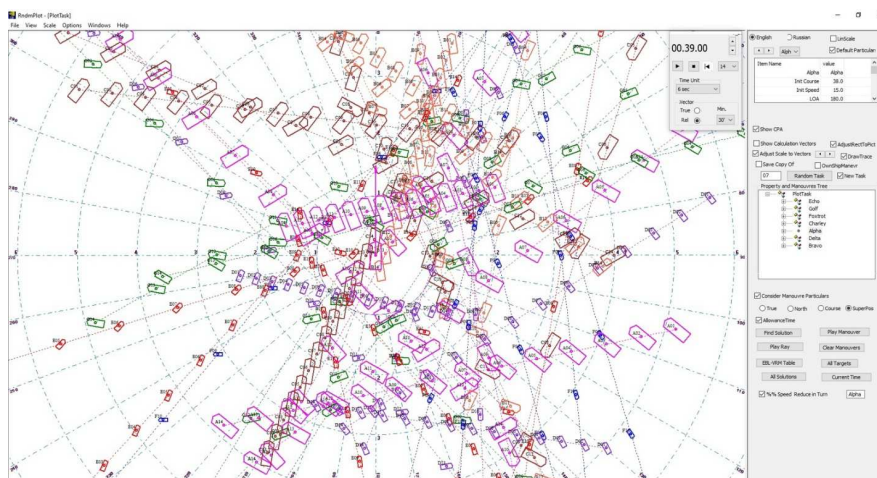


Рис. 8. Моделирование движения группы судов, представленное в относительном движении без маневрирования (ориентация по курсу): наложение изображений со всех судов

В целом по результатам проведения множества вычислительных экспериментов можно сказать о хорошей работе предлагаемого алгоритма совместного маневрирования группы 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 автономном судовождении [26–28]. Её решение состоит из следующих этапов:

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

Последний этап необходим для подтверждения работоспособности алгоритмов маневрирования в специфических условиях эксплуатации морских судов (ветер, волнение, погрешности движения, сбои 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:

- в районе предполагаемого проведения натурных экспериментов (залив Петра Великого) в период с мая по сентябрь возможно волнение до 1 м с вероятностью 90 %. При планировании морских испытаний будет учтён предвари-

тельный прогноз и выбраны периоды с волнением менее 0,5 м, но модель не должна терять остойчивость и управляемость и при волнении 1 м;

- модель должна иметь грузоподъемность 150–200 кг (аккумуляторные батареи или бензиновый электрогенератор, навигационное оборудование и средства связи, бортовой компьютер со своей периферией и др.);
- 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. В таблице 1 приведены некоторые предполагаемые требования к модели судна-катамарана. На рисунке 9 показан вариант возможной компоновки такого катамарана.



Рис. 9. Возможная компоновка катамарана для проведения натурных морских испытаний алгоритмов расхождения

Требования для моделей автономных надводных судов

№ п/п	Параметр	Значение
1	Длина	3,0–4,0 м
2	Ширина	1,5–2,0 м
3	Осадка	0,1–0,2 м
4	Грузоподъемность	150–200 кг
5	Скорость	4–8 уз
6	Силовая установка	2×1000 Вт
7	Аккумуляторные батареи	10 кВт/ч
8	Бензиновый электрогенератор	2,5 кВт
9	Автономность	5–10 ч
10	Состояние моря	До 3 баллов
11	Ветер	До 4 м/с

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; накоплен достаточно большой опыт её использования.

Для применения описанного метода расхождения судов на практике потребуется 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 группы судов с учетом их текущих и планируемых после завершения манёвра скоростей и курсов.

Суть предлагаемого метода 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 своём положении, параметрах движения и планируемом маршруте в общий информационный сервис, и на каждом судне принимается решение о маневрировании, приемлемое для всей группы судов. Такой метод 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 натуральных экспериментов, позволяющих оценить перспективы дальнейшего практического внедрения предлагаемого метода.

Благодарность

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».

Список источников

1. Онтологии и безопасность автономных (беспилотных) автомобилей / О.Н. Покусаев, В.П. Куприяновский, Д.В. Катцын, Д.Е. Намиот // *International Journal of Open Information Technologies*. 2019. № 2. С. 81–93.
2. Гусев С.И., Епифанов В.В. Проблемы внедрения беспилотных автомобилей в экономическую среду // *Вестник Ульяновского государственного технического университета*. 2021. № 1. С. 44–49.
3. Кисуленко Б.В. Безопасность автоматизированных/беспилотных автомобилей и её оценка при допуске к эксплуатации // *Автомобильная промышленность*. 2022. № 2. С. 7–13.
4. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. № 4. С. 13–23.
5. Афонин И.Л., Иевлев К.В., Атяшкин Д.В. Система идентификации гражданских беспилотных летательных аппаратов // *Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций*. 2019. № 2. С. 41.
6. Матюха С.В. Анализ перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в авиаперевозках // *Транспортное дело России*. 2021. № 3. С. 26–27. DOI: 10.52375/20728689_2021_3_26.
7. Попов А.С., Усмонов Е.М., Сухачев Н.В. Способ навигации беспилотных летательных аппаратов на основе системы технического зрения // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2022. № 2. С. 11–19. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-02-2.
8. Анализ погрешностей определения линейных и угловых координат магнитометрической системы навигации беспилотного летательного аппарата / И.М. Голев, Т.И. Заенцева, М.В. Желонкин [и др.] // *Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник*. 2020. № 12. С. 3–8. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-12-1.
9. Кириллова М.А., Рожко А.И. Перспективы развития безэкипажных судов в Российской Федерации // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2020. № 3. С. 16–22. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-16-22.
10. Основные тренды внедрения технологий искусственного интеллекта в управлении морскими автономными надводными судами / А.И. Епихин, А.В. Игнатенко, Д.Е. Студеникин, Е.В. Хекерт // *Эксплуатация морского транспорта*. 2021. № 1. С. 88–96. DOI: 10.34046/aumsuomt98/14.
11. Мошняков Д.А., Пушкарев И.И., Черняхович С.Е. Создание базовых технологий для развития безэкипажного судовождения // *Морское оборудование и технологии*. 2020. № 2. С. 17–25.

12. Корнев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 4-1. С. 158–165. DOI: 10.37220/МИТ.2021.54.4.047.
13. 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. № 3. С. 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.
14. Дыда А.А., Нгуен В.Т., Оськин Д.А. Система управления курсом судна с компенсацией действия внешних возмущений на работу рулевой машины // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 4. С. 34–42. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-4-34-42.
15. Ардельянов Н.П. Промежуточные результаты концепции е-навигации // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф.Ф. Ушакова. 2022. № 2. С. 8–11.
16. Ривкин Б.С. Е-навигация. Прошло 5 лет // Гироскопия и навигация. 2020. № 1. С. 101–120. DOI: 10.17285/0869-7035.0026.
17. Сайт проекта А-навигации. URL: <https://www.a-nav.org/ru/index.html> (дата обращения: 13.06.2023).
18. 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. Vol. 6, no. 3. P. 345–353.
19. 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. Т. 11, № 3. С. 140–152. DOI 10.24866/VVSU/2073-3984/2019-3/140-152.
20. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шуленина А.В. Оценка эмоциональной нагрузки на судоводителей в условиях коллективного движения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11, № 4. С. 640–651. DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-4-640-651.
21. Патент № 2657708 Российская Федерация. Тренажерный комплекс для подготовки судоводителей: заявл. 17.04.2017; опубл. 14.06.2018 / Петров В.А., Шарлай Г.Н., Пузачев А.Н.
22. Degre T., Lefevre X. A collision avoidance system // Journal of Navigation. 1981. Vol. 34. P. 294–302.
23. 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. Vol. 56. P. 411–427.
24. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Нечеткая система предупреждения об опасном сближении морских судов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2016. № 2. С. 93. DOI 10.7868/S0002338816010078.
25. Гриняк В.М., Иваненко Ю.С., Девятисильный А.С. Визуализация параметров траектории безопасного движения судна // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14, № 8. С. 52–60.
26. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Трофимов М.В. Визуальное представление параметров траектории безопасного движения судна // Морские интеллектуальные технологии. 2016. № 3-1 (33). С. 269–273.
27. 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. № 4 (38). С. 51–61. DOI 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.

28. Акмайкин Д.А., Букин О.А., Гриняк В.М. Комплексное использование данных метеоспутников для измерения параметров ветра и волнения вдоль маршрута судна // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9, № 5. С. 941–953. DOI 10.21821/2309-5180-2017-9-5-941-953.

References

1. On ontology and security of autonomous (driverless) cars / O.N. Pokusaev, V.P. Kupriyanovskii, D.V. Kattsyn, D.E. Namiot. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019; 7(2): 81–93.
2. Gusev S.I., Epifanov V.V. Problems of introduction of unmanned vehicles in the economic environment. *Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University*. 2021; (1): 44–49.
3. Kisulenko B.V. Safety of automated/autonomous vehicles and its assessment before permission for operation. *Automotive industry*. 2022; (2): 7–13.
4. Bondarev A.N., Kirichek R.V. Overview of unmanned aerial apparatus for general use and regulation of air UAV movement in different countries. *Telecom IT*. 2016; 4 (4): 13–23.
5. Afonin I.L., Ievlev K.V., Atyashkin D.V. Identification system of civil unmanned aerial vehicles. *Modern problems of radio electronics and telecommunications*. 2019; (2): 41.
6. Matyukha S.V. Analysis of the prospects for the use of unmanned aerial vehicles in air transportation. *Transport business of Russia*. 2021; (3): 26–27.
7. Popov A.S., Usmonov E.M., Sukhachev N.V. Method of navigation of unmanned aerial vehicles based on technical vision system. *Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2022; (2): 11–19.
8. Analysis of errors in determining linear and angular coordinates of the magnetometric navigation system of an unmanned aerial vehicle / I.M. Golev, T.I. Zaentseva, M.V. Zhe-lonkin [et al.]. *Transport: science, equipment, management. Scientific Information Collection*. 2020; (12): 3–8.
9. Kirillova M.A., Rozhko A.I. Prospects of development of unmanned ships in Russian Federation. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Technology and Technology*. 2020; (3): 16–22.
10. Trends, prospects and technologies for modern and cutting-edge power plants within maritime industry incorporating aspects of autonomous shipping / A.I. Epikhin, A.V. Ignatenko, D.E. Studenikin, E.V. Khekert. *Operation of marine transport*. 2021; (1): 88–96.
11. Moshnyakov D.A., Pushkarev I.I., Chernyakhovich S.E. Creation of basic technologies for the development of unmanned navigation. *Marine equipment and technology*. 2020; (2): 17–25.
12. Korenev A.S., Khabarov S.P., Shpektorov A.G. A route calculation for unmanned vessel. *Marine intelligent technologies*. 2021; (4-1): 158–165.
13. Dyda A.A., Pushkarev I.I., Chumakova K.N. Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2021; 13 (3): 307–315.
14. Dyda A.A., Nguen V.T., Os'kin D.A. Ship course control system with compensation of external disturbance on steering gear. *Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Technology and Technology*. 2021; (4): 34–42.
15. Ardel'yanov N.P. Intermediate results of the e-navigation concept. *Bulletin of Admiral F.F. Ushakov State Maritime University*. 2022; (2): 8–11.
16. Rivkin B.S. E-navigation: 5 years later. *Gyroscopy and Navigation*. 2020; 28 (1): 101–120.
17. Cite of A-navigation project. URL: <https://www.a-nav.org/ru/index.html> (date of request: 13.06.2023).
18. 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.

19. Grinyak V.M., Shilenina A.V. Marine traffic safety estimation by emotional load on a navigator metric. *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*. 2019; 11 (3): 140–152.
20. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Shulenina A.V. Estimation of the emotional load on the navigators under the conditions of heavy traffic. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2019; 11 (4): 640–651.
21. Patent RU 2657708. Simulator complex for ship driver training: Date of filing 17.04.2017: Date of publication 14.06.2018 / Petrov V.A., Sharlay G.N., Puzachev A.N.
22. Degre T., Lefevre X. A collision avoidance system. *Journal of Navigation*. 1981; (34): 294–302.
23. 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.
24. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S. Fuzzy collision avoidance system for ships. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2016; 55 (2): 249–259.
25. Grinyak V.M., Ivanenko Y.S., Devyatisilnyi A.S. Data visualization of ship collision avoidance system. *Information measurement and control systems*. 2016; 14 (8): 52–60.
26. Grinyak V.M., Devyatisilnyi A.S., Trofimov M.V. Data visualization of ship collision avoidance system. *Marine intellectual technologies*. 2016; 3-1 (33): 269–273.
27. Grinyak V.M., Trofimov M.V., Lulko V.I. Data visualization of ship collision avoidance system. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2016; 4 (38): 51–61.
28. Akmaykin D.A., Bukin O.A., Grinyak V.M. Complex employment of data of meteorological satellites for meterage wind and wave parameters along the ship's route. *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov*. 2017; 9 (5): 941–953.

Информация об авторах:

Артемьев Андрей Владимирович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток. E-mail: artemyev@msun.ru

Петров Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры судовождения, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Владивосток. E-mail: petrov@msun.ru

Гриняк Виктор Михайлович, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры информационных технологий и систем ВВГУ, г. Владивосток. E-mail: viktor.grinyak@vvsu.ru

DOI: <https://doi.org/10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119>

Дата поступления:
19.06.2023

Одобрена после рецензирования:
22.06.2023

Принята к публикации:
26.06.2023