

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270

OVERVIEW OF CURRENT ALGORITHMS FOR AUTONOMOUS VESSELS ROUTE OPTIMIZATION

A. A. Chabak

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

An overview of multiple current algorithms for optimizing the routes of autonomous surface vessels is provided in the paper. One of the effective methods for route optimization is the implementation of algorithms and software based on graph theory to prevent collisions. Key algorithms include Dijkstra's algorithm, A, artificial potential fields, the "dynamic window" method, and the velocity obstacle method. Collision prevention using radar of the maritime autonomous navigation vessel, geometric vessel factors, genetic algorithms, neural network training is also separately discussed. While most algorithms are only considered theoretically, some works describe practical observations: neural networks using deep learning, Markov decision processes, Q-learning; developed autonomous collision avoidance system; heuristic search for optimal ship routes using the A2015 algorithm. Overall research analysis shows that many authors have made significant progress in their work, but the topic is not fully explored. Some works do not consider divergence with multiple vessels, while others do not utilize maneuvers involving speed changes. Certain works face challenges in parameter tuning for algorithm efficiency. The optimality criterion for multiple maneuvering, considering factors beyond minimizing the closest point of approach to another vessel, such as responsibility distribution for maneuver execution, is not fully developed. It is noted that all necessary conditions for creating a universal algorithm in the future already exist due to modern technologies and the research topic relevance.*

Keywords: autonomous navigation, unmanned surface vessels, route optimization, collision avoidance, path planning, current algorithms.

For citation:

Chabak, Artem A. "Overview of current algorithms for autonomous vessels route optimization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 259–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270.

УДК 656.61.052

ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ПО ОПТИМИЗАЦИИ МАРШРУТОВ АВТОНОМНЫХ СУДОВ

А. А. Чабак

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

В статье выполнен обзор различных алгоритмов по оптимизации маршрутов морских автономных надводных судов. Отмечается, что актуальным и действенным методом оптимизации маршрутов является внедрение алгоритмов и программной базы по предотвращению столкновения, основанных на теории графов. Основными способами являются алгоритм Дейкстры, A, искусственные потенциальные поля, метод «динамического окна», метод скоростного препятствия. Также отдельно рассматривается предотвращение столкновения с использованием радара морского автономного навигационного судна, геометрических факторов судов, генетического алгоритма, обучения нейронной сети. При этом большинство алгоритмов рассматривается только как теоретическое решение поставленных задач. Вместе с тем в некоторых работах описаны результаты, полученные при проведении экспериментальных натурных испытаний, а именно: нейронные сети, использующие глубокое обучение, марковский процесс принятия решений, Q-обучение; созданная с нуля система автономного предотвращения столкновения с использованием концепции поиска заменяемого пространства действий; эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути с использованием алгоритма A2015. Общий анализ исследований показал, что многие авторы значительно продвинулись в своих исследованиях — в них видна положитель-*

ная динамика исследования, однако необходимо совершенствовать существующие алгоритмы для решения поставленных задач, поскольку в одних работах не рассматривается расхождение с несколькими судами, в других не используется маневр, связанный с изменением скорости, в отдельных работах существует сложность настройки параметров для эффективной работы алгоритма. Не в полной мере разработан также критерий оптимальности при совместном маневрировании, учитывающий не только обеспечение минимального значения кратчайшей дистанции до судна в системе, но и другие факторы, такие как распределение обязанностей по выполнению маневров судов.

Ключевые слова: автономная навигация, безэкипажные суда, оптимизация маршрутов, предотвращение столкновений, планирование маршрута, актуальные алгоритмы.

Для цитирования:

Чабак А. А. Обзор актуальных алгоритмов по оптимизации маршрутов автономных судов / А. А. Чабак // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 259–270. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-259-270.

Введение (Introduction)

Современное мореплавание переживает период значительных трансформаций благодаря автономным судам, обладающим способностью самостоятельно принимать решения и управлять маршрутами без непрерывного участия человека. Эти инновационные технологии не только могут повысить эффективность и экономическую выгоду морской индустрии, но также внести значительный вклад в обеспечение безопасности судоходства и снижение отрицательного воздействия на окружающую среду.

Главным аспектом успешного функционирования автономных судов является *оптимизация их маршрутов* — сложная и многогранная научная проблема, объединяющая различные факторы, начиная с экономических выгод и безопасности плавания и заканчивая использованием ограниченных ресурсов и соблюдением руководств. Существует множество подходов к решению задачи совместного маневрирования группы автономных судов при возникновении опасности столкновения. В 2017 г. Международная морская организация (ИМО) приняла решение о включении термина «морское автономное надводное судно» (МАНС) в рассмотрение проблем навигации для таких судов [1]. С тех пор методы для предотвращения столкновения [2] и оптимизации маршрута рассматривались отдельно. Совместная задача универсального, удовлетворяющего современным реалиям навигации и перевозки грузов, выбора пока еще не решена.

Актуальным и действенным методом оптимизации маршрутов является внедрение алгоритмов и программной базы по предотвращению столкновения, основанных на теории графов, описываемых в источниках [3]–[5]. Основными алгоритмами являются алгоритм Дейкстры, A* (A-star), искусственные потенциальные поля (Artificial Potential Fields (APF)), метод «динамического окна» (Dynamic Window Approach (DWA)), метод скоростного препятствия (Velocity Obstacle (VO)). Также отдельно рассматриваются предотвращение столкновения с использованием только радара МАНС [6], геометрические факторы судов [7], генетический алгоритм [8] и обучение нейронной сети [9].

Разнообразие вариантов подхода к решению задачи оптимизации заключается в сложности реализации программного обеспечения с учетом следующих факторов:

– критерий оптимальности при совместном маневрировании, т. е. учитывающий не только обеспечение минимального значения кратчайшей дистанции до судна в системе, но и другие факторы, например, распределение обязанностей по выполнению маневров судов:

– «Международные правила предупреждения столкновения судов в море (МППСС-72)» (Правила МППСС-72);

- потенциальные статические и динамические препятствия;
- кратчайшая дистанция и время до столкновения;
- учет ветра, течений и других гидродинамических условий;
- обход опасных для навигации зон.

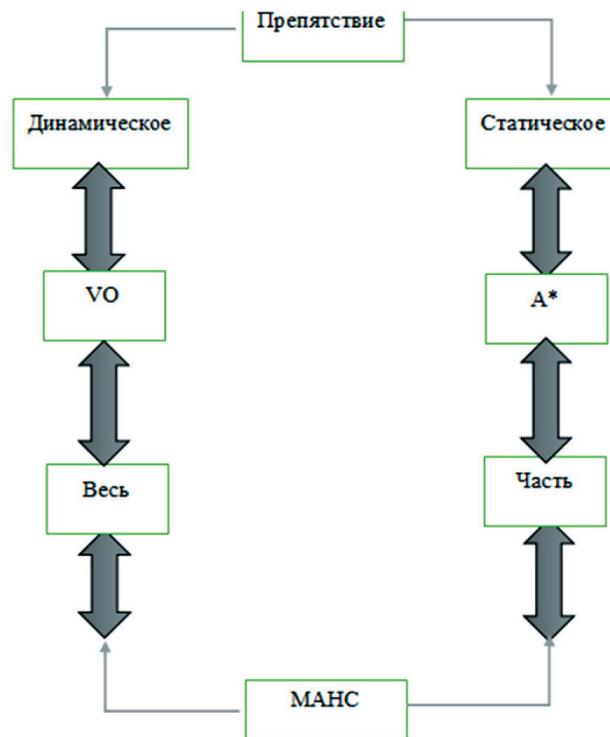
Целью данного исследования является обзор различных существующих методов оптимизации маршрутов автономных судов с позиции предотвращения столкновения.

Задачи данной работы:

- рассмотреть существующие методы расхождения автономных судов с динамическими и статическими препятствиями: другие суда, плавучие буи, маяки, рыболовные сети и т. п.;
- определить, какие из них наиболее полно описывают решение задачи.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В исследовании [10] для обеспечения безопасности автономной навигации морского автономного навигационного судна исследуется предотвращение столкновения как со статическими объектами, так и с динамическими. В зависимости от этого выбирают алгоритм A^* или метод скоростного препятствия. Общая концепция столкновения приведена на схеме при планировании маршрута МАНС. Согласно глобальной информации по навигационной области предотвратить столкновение со статическим препятствием проще, изменив только часть маршрута, в то время как после маневра с динамическим препятствием морская обстановка может значительно измениться и необходимо будет менять маршрут целиком. Расположение в исходно запланированном пути может являться непроходимой зоной из-за вторжения динамического препятствия. В этой ситуации используется *метод скоростного препятствия* для завершения маневра.



Однако из-за возможных непредсказуемых рисков во время маневра возникают сложности, вызванные необходимостью гарантировать результативность алгоритма скоростного препятствия в реальных условиях. В связи с этим в алгоритм скоростного препятствия вносят изменения для обеспечения надежности. Возможные варианты таких изменений описаны в статьях [11]–[16]. В исследовании [11] метод скоростного препятствия рассматривают как модель электрического поля, используя для выделения силы влияния предотвращения столкновения в модели поля скорости гауссовское распределение. В статье [12] отмечается, что преимущественно необходимо изменять курс судна, а не скорость. Алгоритм работает на базе изучения скоростных конусов судна при условии, что скорость МАНС не будет изменяться. Сравнивают текущую скорость судна и скоростной конус препятствия для расчетов безопасных курсов, на которые может лечь судно для предотвращения столкновения. В публикации [13] основная идея заключается в улучшении пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора для следования судна по треку в целях компенсации возможных отклонений результатов алгоритма скоростного препятствия.

В исследовании [17] предложены улучшенный алгоритм A^* для планирования пути МАНС и улучшенный *метод динамического окна* (IDWA) для предотвращения столкновений. Сначала, с учетом требований МППСС-72, область поиска была заново подвергнута проверке, уменьшено количество путей МАНС. Затем был внедрен улучшенный алгоритм A^* в целях предоставления возможности МАНС избежать статических препятствий и достичь своего пункта назначения без попадания под местную оптимизацию. Кроме того, для обучения весовых коэффициентов целевой функции IDWA использовался метод сети Deep Q. Таким образом, улучшенный алгоритм создания маршрута во время предотвращения столкновения является наиболее безопасным и рациональным. Для проверки выполнения предложенного алгоритма планирования пути было проведено сравнительное экспериментальное исследование с использованием традиционного *метода динамического окна* (DWA). Чтобы гарантировать возможность рассмотрения только безопасных траекторий для создания пространства поиска скорости в 2D для планирования пути МАНС и принятия решений о предотвращении столкновений, алгоритм DWA учитывает только траектории, определенные скоростными векторами, приемлемыми для МАНС. Следовательно, в источнике рассматриваются следующие ограничения приемлемых скоростей в соответствии с характеристиками динамики МАНС и окружающей навигационной средой:

1. МАНС ограничивается своей собственной максимальной скоростью и угловой скоростью. Пространство поиска может быть уменьшено ограничениями на приемлемые скорости.

2. МАНС подвергается воздействию характеристик механической системы управления движением из-за ограничения тяги винта и механизмов управления рулем МАНС имеет максимальное ускорение и максимальное замедление. С учетом ограниченного ускорения и замедления общее пространство поиска скорости может быть уменьшено до скоростей, достижимых в определенном временном интервале.

3. Для того чтобы позволить МАНС остановиться перед столкновением с препятствием, установленные ограничения допустимых скоростей должны быть рассчитаны.

С учетом указанных ограничений для пространства поиска скоростей МАНС более рациональное приемлемое пространство скоростей может определить полученное пространство поиска приемлемых скоростей МАНС. Учитывая пространство приемлемых скоростей МАНС, можно создать бесчисленное множество возможных траекторий МАНС с использованием полученного пространства поиска скоростей. Целевая функция курса определяется для измерения соответствия направления движения МАНС направлению на цель. Когда направление движения МАНС полностью указывает на целевую точку, значение этой функции является максимальным. Функция скорости представляет собой прямое проецирование скорости МАНС для ее оценки на соответствующей траектории. Если линейная скорость судна выше в следующий момент времени, то достигается более высокое значение функции. С учетом критериев направления на цель расстояния до ближайших препятствий и продольной скорости можно определить максимум целевой функции в приемлемом пространстве. Однако следующие *слабые места*, связанные с исходным методом DWA, требуют внимания:

- при движении рядом с судами МАНС должен получать рекомендации по предотвращению столкновений в соответствии с МППСС-72;
- несмотря на то, что метод DWA использует целевую функцию для выбора оптимальных команд скорости МАНС, коэффициенты веса целевой функции должны быть выбраны рационально с учетом критерия оптимальности.

В статье [18] также рассматривается улучшенный *метод динамического окна* (IDWA), однако помимо этого предлагается алгоритм местного планирования маршрута на основе *трехступенчатой стратегии избегания столкновений*, соответствующей тому, что движущееся судно находится далеко, движущее судно находится близко, но при этом риск столкновения низкий, а также судно находится близко и существует опасность столкновения. На первой ступени предложена область маневрирования, во избежание динамического препятствия, и улучшенный *метод динамического окна*, а также включается окружающее воздействие для повышения эффективности маневра и уменьшения расхода топлива. На второй и третьей ступенях метод скоростного

препятствия и МППСС-72 объединены. Для выбора оптимальной динамической целевой точки введено ограничение метода скоростного препятствия на второй ступени, на третьей существует ограничение по изменению курса влево и механизм оценки по изменению курса вправо для расчета динамических целевых точек в соответствии с МППСС-72. Результаты симуляции показывают, что предлагаемая стратегия и алгоритм позволяют избежать статических препятствий и одиночного движущегося судна одновременно.

Особенности использования метода скоростного препятствия:

1. Предлагаемый метод позволяет предотвратить столкновение только с одним судном, а не с несколькими.
2. Рассматривается только часть маршрута, а не весь путь судна.
3. Скорость и плавность возвращения судна на трек нуждается в улучшении.

В исследованиях [19]–[21] предложен метод планирования маршрута для МАНС на основе вероятности столкновения и алгоритма A^* . Сначала были выбраны объекты в канале, такие как сам канал, маяк и причал. Распределение вероятности столкновения описано моделью искусственного потенциального поля (APF — Artificial Potential Field). На основе данных истории АИС получено распределение траекторий на различных участках. Значения параметров в модели APF решаются с помощью нелинейной оптимизации по данным АИС. После получения распределения искусственного потенциального поля оптимальный маршрут находится с помощью алгоритма A^* . Чтобы решить проблему, связанную со сложностью обработки маршрута для распределения вероятности, предложен алгоритм сглаживания на основе регрессионного анализа. Этот алгоритм основан на реальных маршрутах судов и поэтому более надежен. При планировании маршрута также учитывались маневренные характеристики МАНС.

В источнике [22] рассмотрен метод муравьиной колонии для предотвращения столкновения. Суть его заключается в том, что существует область, в которой движутся суда, обозначаемая множеством E , которое делится на подмножество E_{free} , т. е. свободное пространство, и E_{obs} — препятствия. Эти данные МАНС получает, например, с помощью средств автоматической радиолокационной прокладки, после чего выполняется расчет относительной скорости цели, ее курса и пеленга. Помимо этого алгоритм проверяет наличие опасных статических объектов, в итоге составляется граф, в котором инициализируется метод муравьиной колонии. В нем МАНС каждую путевую точку выбирает отдельно, следуя по наиболее благоприятному пути в зависимости от критерия оптимизации. Однако автор уточняет, что маневр изменения скорости не применялся в алгоритме, а также не учитывались изменения скорости и курсов других судов. Такая же проблема рассмотрена в статье [23], автор которой разделил алгоритм на две части: в первой использовал грид-вычисления (или метод сетки) в программной среде MATLAB для моделирования маршрута, во второй поместил МАНС и препятствия на пути этого маршрута для симуляции и проверки эффективности алгоритма. Данный метод заключается в использовании сетки одинакового размера для разделения рабочего пространства МАНС и использовании сетки для представления окружающей среды, где каждая точка имеет одно из двух состояний: свободное пространство или препятствие. Процедура по определению кратчайшего пути следующая:

1. *Матрица смежности на карте.* Вводится матрица, состоящая из 0 и 1, которая указывает на то, что МАНС необходимо найти оптимальный маршрут на карте, где 0 представляет собой доступное местоположение, а 1 — препятствие.

2. *Операции базовых действий сеточного метода в двумерном пространстве.* Алгоритм поиска представляет собой сетку. Предположим, что МАНС в данный момент находится в узле n , поэтому у него есть восемь возможных базовых движений, которым соответствует восемь масштабируемых узлов, обозначенных следующим образом: север (N), северо-восток (NE), восток (E), юго-восток (SE), юг (S), юго-запад (SW), запад (W), северо-запад (NW).

3. *Оценка критерия расстояния.* Начиная с определенной точки, местоположение, которое можно достичь за один шаг, имеет препятствие 0. Для местоположения, которое можно достичь за один шаг, рассчитывается длина его пути с длиной стороны 1.

В итоге алгоритм справляется с оптимизацией маршрута за 40 генераций, но так же, как и в статье [22], не учитываются изменения скорости и курсов других судов. В статье [24] сделана попытка использовать метод сетки для предотвращения столкновения со статическими препятствиями путем формирования подточек на касательном угле препятствия с использованием веса каждого для создания возможных путей. На первом этапе веса препятствий определяются на основе того, являются ли соседние ячейки также препятствиями или нет. Вторым этапом является оптимизация маршрута на основе динамического программирования для нахождения кратчайших путей среди возможных. При использовании динамического программирования глобальная проблема планирования пути разбивается на более простые подзадачи, что позволяет более легко определить и более гибко управлять процессом решения проблем оптимизации. МАНС моделируется уравнениями движения шести степеней свободы с параметрами, определенными на основе физической модели судна. В статье представлены результаты моделирования для демонстрации успешной работы метода. Отдельно отмечается, что из-за ограниченной маневренности МАНС самый короткий путь, полученный с использованием динамического программирования, не всегда является наименьшим пройденным путем и самое кратчайшее расстояние не гарантирует максимально короткого периода в пути.

Авторы исследования [25] предлагают решение проблемы оптимизации при помощи *метода роя частиц*. Данный метод был официально представлен инженером-электриком Р. Эберхартом и социальным психологом Дж. Кеннеди в 1995 г. [26]. Это еще один имитирующий интеллектуальный алгоритм после генетического алгоритма, идея которого возникла на основе изучения поведения птиц, ищущих пути поиска пищи. В нем «объекты» преодолевают пространство поиска для нахождения оптимального положения, которое сводит определенную задачу к максимуму или минимуму. Алгоритм метода роя частиц моделирует характеристики целевой функции со скоростью сходимости, из которых возникает идея решения проблемы, на основе которой данная проблема оптимизируется. В статье предложено использовать метод роя частиц вместе с оптимизацией параметров ПИД регулятора, а также введено понятие оптимального энергопотребления для прокладки маршрута с целью экономии энергии и расхода топлива. Согласно фактическим навигационным требованиям сначала создается математическая модель и модель для избежания столкновений в целях обеспечения безопасной навигации МАНС, в частности предотвращения столкновения с неподвижными препятствиями, затем рассчитываются значения пригодности каждой частицы в области. При этом предполагается, что каждая i -я частица имеет уникальное значение пригодности на каждой итерации, вычисляемой посредством оценки целевой функции. Эти значения сравниваются, и выбирается лучший критерий оптимизации. В итоге, на основе этого критерия выводится оптимальное решение по маршруту, которое также внедряется в ПИД регулятор для того, чтобы понять, сможет ли судно правильно удерживать курс на протяжении всего пути.

В статье [27] описан метод решения проблемы избежания препятствия для безэкипажных судов с применением нейронных сетей и глубокого обучения с подкреплением. Этот метод включает создание соответствующего алгоритма принятия решений во избежание препятствий, называемого DRLOAD (Deep Reinforcement Learning Obstacle Avoidance Decision-Making). В основе данного метода лежит марковский процесс принятия решений. В процессе обучения нейронная сеть использует текущее состояние МАНС как входные данные, таблица значений выполняемых действий Q представлена в качестве выходных данных. Обучение модели поведения достигается путем тренировки соответствующих максимальных значений Q . В зависимости от текущего состояния алгоритм позволяет безэкипажному судну предпринимать соответствующие действия.

Модель среды, в которой тестировался этот метод, представляет собой сеточную карту с двумерным изображением, где каждая точка имеет значение состояния от 0 до 1 (0 — препятствие, 1 — свободное пространство). Важной частью алгоритма является функция вознаграждения за избежание столкновений, которая определяет цель задачи для МАНС. Проведенное тестирование алгоритма DRLOAD в среде MATLAB состояло из двух частей: стремление достичь цели и предотвращение столкновения. В случае, когда в окружении нет препятствий или препятствие

находится на безопасном расстоянии, МАНС корректирует направление к точке маршрута, когда препятствие появляется в пределах безопасного расстояния, безэкипажное судно использует стратегию глубокого обучения для предотвращения столкновения. В итоге результаты моделирования можно считать эффективными как по отношению к статическим объектам, так и к динамическим.

Отдельный алгоритм был создан для эвристического поиска оптимального маршрута судна по Северному морскому пути, описанный в статье [28]. Основной проблемой передвижения по Северному морскому пути является наличие льдов, поэтому выбор наиболее оптимального варианта движения основан на объеме информации о пути, состоянии судна и других факторах. Для создания алгоритма критериями оптимизации были выбраны время перехода по кратчайшему расстоянию в ледовых условиях и положение портов, между которыми выполнялся переход. Эвристический алгоритм A2015 сравнивался с алгоритмом Дейкстры и Флойда – Уоршелла, на основании чего был сделан следующий вывод: разработанный алгоритм позволяет на первом этапе построения маршрута найти приближенные решения и перейти к поиску оптимального маршрута на основе точных алгоритмов, при этом результат достигается за меньшее количество операций при одинаковом числе вершин графа.

Особо следует отметить исследования [29] и [30], в которых описано проведение «живого» эксперимента по предотвращению столкновения четырех МАНС. Для выбора безопасного маршрута используется система автономного предотвращения столкновения (Autonomous Collision Avoidance System (ACAS)) с применением концепции поиска заменяемого пространства действий, в которой пространство может изменяться в зависимости от уровня риска столкновения. Для эффективной оценки риска используется нечеткая логика. ACAS была проверена на прототипе МАНС, ARAGON1 с использованием АИС [30]. Важно было вовремя обнаружить и отследить препятствия для автономного предотвращения столкновений. В качестве основного сенсора использовался импульсный радар. Однако, из-за слепой зоны радара, испытания по обнаружению и отслеживанию препятствий проводились с использованием нескольких сенсоров, таких как электрооптическая камера, инфракрасная камера и Лидар. ACAS была проверена на втором и последнем прототипе МАНС, ARAGON2 и ARAGON3. Испытания в сложных ситуациях столкновений с несколькими судами: судами, идущими друг на друга, пересекающимися судами и при обгоне, проводились с использованием информации о препятствиях из отслеживаемых данных, рассчитанных на основе слияния датчиков. Также в каждом МАНС была установлена система автономной навигации, состоящая из трех основных подсистем для предотвращения столкновений, таких как навигационные датчики в реальном времени (Real-Time Kinematic (RTK)) GPS и интегрированная навигационная система (Integrated Navigation System (INS)), система обнаружения и отслеживания объектов на основе множественных сенсоров (Multiple sensor based Object Detection and Tracking system (MDOT)) и система автономного предотвращения столкновений (ACAS). MODT собирает информацию о препятствиях с использованием слияния данных из автоматической идентификационной системы, импульсного радара, лидара и электрооптической и инфракрасной камеры.

Используя заменяемое пространство действий и опасность столкновения на основе нечеткой логики, ACAS рассчитывает оптимальный маршрут через алгоритм предотвращения столкновений. В конечном итоге автопилот активируется для рассчитываемого маршрута. Каждая подсистема в каждом МАНС работает в режиме реального времени. Группа МАНС обменивается навигационной информацией собственного судна и препятствиями друг с другом через канал связи LTE. В SANS каждое МАНС может управляться автономно или удаленно через канал связи LTE с наземной станцией управления, в которой пользователь может отслеживать и контролировать группу МАНС раздельно или одновременно, используя систему управления и команд на основе электронной навигационной карты. В группе МАНС одно судно рассматривается как препятствие для других автономных судов, поэтому все МАНС должны предпринимать меры по предотвращению столкновения друг с другом, используя навигационную информацию. Испытания показали, что несмотря на то, что метод нуждается в доработке по определению оптимальной кратчайшей дистанции и времени до столкновения, четыре автономных судна смогли разойтись друг с другом,

даже сумев предпринять исключительные действия последнего маневра, такие как поворот влево или сбавление хода.

Заключение (Conclusion)

Оптимизация маршрутов автономных судов — важная и актуальная задача, требующая знаний не только в области мореплавания, но и программирования. Использование передовых систем автоматизации и искусственного интеллекта в навигации позволяет судам принимать обоснованные решения, учитывая различные факторы, такие как погода, трафик, соблюдение международных конвенций. Анализ существующих алгоритмов показал, что авторы исследований решения задачи оптимизации маршрутов и предотвращения столкновения судов в большинстве случаев предлагают использовать алгоритмы, на основе теории графов. Поэтому наиболее популярными алгоритмами являются: A^* , метод скоростных препятствий, метод муравьиной колонии, метод роя частиц. Важное применение на практике получили:

– нейронные сети, использующие глубокое обучение, марковский процесс принятия решений, Q -обучение;

– созданная с нуля система автономного предотвращения столкновения с использованием концепции поиска заменяемого пространства действий;

– эвристический поиск оптимального маршрута судна по СМП, используя алгоритм A2015.

Таким образом, цель данной работы выполнена, решены следующие задачи: рассмотрены существующие методы расхождения автономных судов с различными препятствиями; проанализированы современные алгоритмы по оптимизации маршрутов и определены те из них, которые наиболее полно описывают решение задачи.

Обзор описанных в работе исследований показывает положительную тенденцию проведенной в этом направлении работы, однако в дальнейшем необходимо совершенствование существующих алгоритмов для решения поставленных задач, поскольку в одних исследованиях не рассматривается расхождение с несколькими судами, в других — не используется маневр, связанный с изменением скорости, а в некоторых исследованиях существует сложность настройки параметров для эффективной работы алгоритма. Кроме того, не в полной мере разработан критерий оптимальности при совместном маневрировании, т. е. критерий, учитывающий не только обеспечение минимального значения кратчайшей дистанции до судна в системе, но и другие факторы, например, такие как распределение обязанностей по выполнению маневров судов (судно меньшего тоннажа должно быть более маневренным по сравнению с судном большего тоннажа).

Таким образом, необходимо совершенствовать идеи и алгоритмы, которые устанавливают в «мозг» компьютерной системы автономных судов для улучшения безопасности навигации и оценки риска столкновения, возможности проводить испытания безэкипажных судов не только в каналах или прибрежных условиях, но и в открытом море. В настоящее время еще не существует такого алгоритма, который позволяет решить все существующие проблемы и поставленные задачи для того, чтобы автономные суда могли находиться наравне с другими типами судов, однако на основе изучения многочисленных источников можно прийти к выводу, что существуют все необходимые условия для создания алгоритмов, совместимых в перспективе с разными видами автономных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Autonomous shipping. IMO [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/Media-Centre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (дата обращения 10.02.2024).
2. Триполец О. Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
3. Bondy J. A. Graph Theory / J. A. Bondy, U.S.R. Murty. — 1st. ed. — Springer Publishing Company, Incorporated, 2008. — 675 p.
4. Тамм У. Теория графов: Пер. с англ. / У. Тамм. — М.: Мир, 1988. — 424 с.

5. Уилсон Р. Введение в теорию графов / Р. Уилсон; перевод с англ. И. Г. Никитиной; под ред. Г. П. Гаврилова. — М.: Мир, 1977. — 208 с.
6. bin Mohamad Rafi M. S. A. Radar-Based Collision Avoidance on Unmanned Surface Vehicles (USV) / M. S. A. bin Mohamad Rafi, W. Sediono, Z. bin Zainal Abidin // 2022 IEEE 9th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). — IEEE, 2022. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/USYS56283.2022.10073415.
7. Mu D. Geometric Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on Multi-objective / D. Mu, T. Li, X. Han, Y. Fan, X. Sun, Y. Liu // 2022 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). — IEEE, 2022. — Pp. 159–165. DOI: 10.1109/ICoIAS56028.2022.9931210.
8. Fu Z. Method for collision avoidance by USV based on improved genetic algorithm / Z. Fu, H. Wang, Y. Gu, C. Li, H. Tong, H. Wang // Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast. — IEEE, 2020. — Pp. 01–06. DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389254.
9. Триполец О. Ю. Обучение нейронной сети вычислению дистанции кратчайшего сближения между судами / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 5. — С. 713–721. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-713-721.
10. Yan H. An Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on A Star and Velocity-Obstacle Algorithms / H. Yan, Q. Zhu, Y. Zhang, Z. Li, X. Du // 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). — IEEE, 2022. — Vol. 6. — Pp. 77–82. DOI:10.1109/ITOEC53115.2022.9734642.
11. Sun X. Real-time collision avoidance control for unmanned surface vehicle based on velocity resolution method / X. Sun, G. Wang, Y. Fan, D. Mu, B. Qiu, J. Liu // 2019 Chinese Control Conference (CCC). — IEEE, 2019. — Pp. 6668–6673. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866486.
12. Zhuang J. Multiple Moving Obstacles Avoidance for USV using Velocity Obstacle Method / J. Zhuang, Y. Zhang, P. Xu, Y. Zhao, J. Luo, S. Song // 2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). — IEEE, 2021. — Pp. 140–145. DOI: 10.1109/ICUS52573.2021.9641331.
13. Li Y. Real-time collision avoidance planning for unmanned surface vessels based on field theory / Y. Li, J. Zheng // ISA transactions. — 2020. — Vol. 106. — Pp. 233–242. DOI: 10.1016/j.isatra.2020.07.018.
14. Cho Y. Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles / Y. Cho, J. Han, J. Kim, P. Lee, S. B. Park // IFAC-PapersOnLine. — 2019. — Vol. 52. — Is. 21. — Pp. 329–334. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.328.
15. 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.
16. Zhuang J. Collision avoidance for unmanned surface vehicles based on COLREGS / J. Zhuang, J. Luo, Y. Liu, R. Bucknall, H. Sun, C. Huang // 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). — IEEE, 2019. — Pp. 1418–1425. DOI: 10.1109/ICTIS.2019.8883829.
17. Guan W. Autonomous Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles Based on Improved A-Star and Dynamic Window Approach Algorithms / W. Guan, K. Wang // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. — 2023. — Vol. 15. — Is. 3. — Pp. 36–50. DOI:10.1109/MITS.2022.3229109.
18. Wang P. Research on Local Path Planning for Autonomous Collision Avoidance of USV / P. Wang, X. Yao, Q. Fei, J. Meng // 2022 China Automation Congress (CAC) — IEEE, 2022. — Pp. 5368–5373. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10055154.
19. Chao W. A situation awareness approach for USV based on Artificial Potential Fields / W. Chao, M. Feng, W. Qing, W. Shuwu // 2017 4th International conference on Transportation Information and Safety (ICTIS) — IEEE, 2017. — Pp. 232–235. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047770.
20. Chen Q. D. Vector Field-Based Guidance Method for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles / Q. D. Chen, S. W. Huang, M. H. Ho, F. Y. Chung, C. H. Chu, C. M. Liao, J. Guo // 2023 IEEE Underwater Technology (UT). — IEEE, 2023. — Pp. 1–7. DOI: 10.1109/UT49729.2023.10103386.
21. Naeem W. Collision avoidance of maritime vessels / W. Naeem, S. Campbell, M. Abu-Tair // Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles. — 2019. — Pp. 61–84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.
22. Lazarowska A. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimization / A. Lazarowska // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 2. — Pp. 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.

23. Yuan-hui W. Research on Optimal Planning Method of USV for Complex Obstacles / W. Yuan-hui, C. Cen // 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. — IEEE, 2016. — Pp. 2507–2511. DOI:10.1109/ICMA.2016.7558960.

24. Gamayanti N. Global Path Planning for USV Waypoint Guidance System Using Dynamic Programming / N. Gamayanti, R. E. A. Kadir, A. Alkaff // 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). — IEEE, 2020. — Pp. 248–253. DOI: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163712.

25. Ding F. Energy-efficient Path Planning and Control Approach of USV Based on Particle Swarm Optimization / F. Ding, Z. Zhang, M. Fu, Y. Wang, C. Wang // OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. — IEEE, 2018. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604920.

26. Казакова Е. М. Применение метода роя частиц в задачах оптимизации / Е. М. Казакова // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2022. — № 5 (109). — С. 48–57. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-48-57.

27. Wang C. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments / C. Wang, X. Zhang, L. Cong, J. Li, J. Zhang // Evolving Systems. — 2019. — Vol. 10. — Is. 4. — Pp. 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.

28. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.

29. Son N. S. On the sea trial test for the validation of an autonomous collision avoidance system of unmanned surface vehicle, ARAGON / N. S. Son, S. Y. Kim // OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. — IEEE, 2018. — Pp. 1–5. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604803.

30. Son N. S. On an Autonomous Navigation System for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicle / N. S. Son // Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting. — 2013. — Pp. 470–476.

REFERENCES

1. Autonomous shipping. Web. 10 Feb. 2024 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>>.

2. Tripolets, Oleg Y. “Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.

3. Bondy, J. A., and U. S. R. Murty. *Graph Theory*. 1st. ed. Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.

4. Tutte, W. T. *Graph Theory*. Cambridge University Press, 2001.

5. Wilson, Robin J. *Introduction to Graph Theory*. 5th Edition. Pearson, 2010.

6. bin Mohamad Rafi, Muhammad Shahrul Afiq, Wahyu Sediono, and Zulkifli bin Zainal Abidin. “Radar-Based Collision Avoidance on Unmanned Surface Vehicles (USV):” *2022 IEEE 9th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/USYS56283.2022.10073415.

7. Mu, Dongdong, Tanghui Li, Xinjie Han, Yunsheng Fan, Xiaojie Sun, and Yanli Liu. “Geometric Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on Multi-objective.” *2022 5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS)*. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ICoIAS56028.2022.9931210.

8. Fu, Zhongjian, Hongjian Wang, Yingmin Gu, Chengfeng Li, Haiyan Tong, and Haibin Wang. “Method for collision avoidance by USV based on improved genetic algorithm.” *Global Oceans 2020: Singapore–US Gulf Coast*. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389254.

9. Tripolets, Oleg Y. “Training a neural network to calculate the closest point of approach.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.5 (2022): 713–721. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-713-721.

10. Yan, Hongzhou, Qige Zhu, Yifan Zhang, Zhe Li, and Xiaojia Du. “An Obstacle Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicle Based on A Star and Velocity-Obstacle Algorithms.” *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. Vol. 6. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734642.

11. Sun, Xiaojie, Guofeng Wang, Yunsheng Fan, Dongdong Mu, Bingbing Qiu, and Jian Liu. “Real-time collision avoidance control for unmanned surface vehicle based on velocity resolution method.” *2019 Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2019. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866486.

12. Zhuang, Jiayuan, Yuhang Zhang, Peihong Xu, Yi Zhao, Jing Luo, and Shengqing Song. "Multiple Moving Obstacles Avoidance for USV using Velocity Obstacle Method." *2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. IEEE, 2021. DOI: 10.1109/ICUS52573.2021.9641331.
13. Li, Yun, and Jian Zheng. "Real-time collision avoidance planning for unmanned surface vessels based on field theory." *ISA transactions* 106 (2020): 233–242. DOI: 10.1016/j.satra.2020.07.018.
14. Cho, Yonghoon, Jungwook Han, Jinwhan Kim, Philyeob Lee, and Shin-Bae Park. "Experimental validation of a velocity obstacle based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles." *IFAC-PapersOnLine* 52.21 (2019): 329–334. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.328.
15. 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.
16. Zhuang, Jiayuan, Jing Luo, Yuanchang Liu, Richard Bucknall, Hanbing Sun, and Cheng Huang. "Collision avoidance for unmanned surface vehicles based on COLREGS." *2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2019. 1418–1425. DOI: 10.1109/ICTIS.2019.8883829.
17. Guan, Wei, and Kuo Wang. "Autonomous collision avoidance of unmanned surface vehicles based on improved A-star and dynamic window approach algorithms." *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 15.3 (2023): 36–50. DOI: 10.1109/MITS.2022.3229109.
18. Wang, Peiqi, Xiaolan Yao, Qing Fei, and Jiekun Meng. "Research on Local Path Planning for Autonomous Collision Avoidance of USV." *2022 China Automation Congress (CAC)*. IEEE, 2022. 5368–5373. DOI: 10.1109/CAC57257.2022.10055154.
19. Chao, Wu, Ma Feng, Wu Qing, and Wang Shuwu. "A situation awareness approach for usv based on artificial potential fields." *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. IEEE, 2017. 232–235. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047770.
20. Chen, Qing-Da, Sheng-Wei Huang, Ming-Hsin Ho, Feng-Yeang Chung, Chun-Han Chu, Chi-Min Liao, and Jenhwa Guo. "Vector Field-Based Guidance Method for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicles." *2023 IEEE Underwater Technology (UT)*. IEEE, 2023. DOI: 10.1109/UT49729.2023.10103386.
21. Naeem, Wasif, Sable Campbell, and Mamun Abu-Tair. "Collision avoidance of maritime vessels." *Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles*. 2019. 61–84. DOI: 10.1049/PBTR011E_ch3.
22. Lazarowska, Agnieszka. "Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony optimisation." *The Journal of Navigation* 68.2 (2015): 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.
23. Yuan-hui, Wang, and Chi Cen. "Research on optimal planning method of USV for complex obstacles." *2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2016. 2507–2511. DOI: 10.1109/ICMA.2016.7558960.
24. Gamayanti, Nurlita, Rusdhianto Effendi Abdul Kadir, and Abdullah Alkaff. "Global Path Planning for USV Waypoint Guidance System Using Dynamic Programming." *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*. IEEE, 2020. 248–253. DOI: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163712.
25. Ding, Fuguang, Zhaoqing Zhang, Mingyu Fu, Yuanhui Wang, and Chenglong Wang. "Energy-efficient path planning and control approach of USV based on particle swarm optimization." *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604920.
26. Kazakova, E.M. "Application of particle swarm method in the optimization problems." *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS* 5(109) (2022): 48–57. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-5-109-48-57.
27. Wang, Chengbo, Xinyu Zhang, Longze Cong, Junjie Li, and Jiawei Zhang. "Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments." *Evolving Systems* 10.4 (2019): 649–658. DOI: 10.1007/s12530-018-9253-9.
28. Akmaykin, D.A., S. F. Klyueva, and P. A. Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
29. Son, Nam-Sun, and Sun-Young Kim. "On the sea trial test for the validation of an autonomous collision avoidance system of unmanned surface vehicle, ARAGON." *OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604803.
30. Son, N.S. "On an Autonomous Navigation System for Collision Avoidance of Unmanned Surface Vehicle." *Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting*. 2013. 470–476.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Чабак Артём Андреевич — аспирант
Научный руководитель:
Дерябин Виктор Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: beshan74@gmail.com, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chabak, Artem A. — Postgraduate
Supervisor:
Deryabin, Viktor V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: beshan74@gmail.com, kaf_nav@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 11 марта 2024 г.
Received: March 11, 2024.*