



УДК 519.876.2, 004.89

**ОБЗОР И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСХОЖДЕНИЯ
АВТОНОМНЫХ НАДВОДНЫХ СУДОВ****Колмогорова Светлана Сергеевна,**

кандидат технических наук, доцент,

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

ss.kolmogorova@mail.ru, Россия,

Соловьев Кирилл Дмитриевич,

магистр,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.

Ульянова (Ленина)

Гусев Данило Алексеевич,

магистр,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.

Ульянова (Ленина)

Аннотация

В работе выполнен обзор и сравнительный анализ современных методов расхождения автономных надводных судов. Рассмотрены три группы алгоритмов: методы на графах, методы искусственных потенциальных полей, реактивные методы и обучающиеся алгоритмы. Проведен анализ их применимости с учетом МППСС-72, динамических характеристик судна и ограничений бортовых вычислителей.

Ключевые слова: автономный объект, планирование маршрута, МППСС-72, метод потенциальных полей, A^* , граф видимости, диаграмма Вороного, метод скоростных препятствий.

**OVERVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS OF COLLISION AVOIDANCE
METHODS FOR AUTONOMOUS SURFACE VESSELS****Kolmogorova Svetlana Sergeevna,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov

St. Petersburg State Electrotechnical University 'LETI' named after V.I. Ulyanov (Lenin)

ss.kolmogorova@mail.ru

Solovyev Kirill Dmitrievich,

Master,
St. Petersburg State Electrotechnical University 'LETI' named after V.I. Ulyanov (Lenin)

Gusev Danilo Alekseevich,

Master,
St. Petersburg State Electrotechnical University 'LETI' named after V.I. Ulyanov (Lenin)

ABSTRACT

Research work presents a review and comparative analysis of modern methods for navigating autonomous surface vessels. Three groups of algorithms are considered: graph methods, artificial potential field methods, reactive methods, and learning algorithms. Their applicability is analyzed, taking into account the COLREGs-1972, the vessel's dynamic characteristics, and the limitations of onboard computers.

Keywords: autonomous object, route planning, COLREGs, potential field method, A*, visibility graph, Voronoi diagram, velocity obstacles.

Введение

Безопасность мореплавания в значительной степени определяется способностью судов расходиться с другими судами и препятствиями. Эта задача решалась судоводителем на основе визуального наблюдения, радиолокации и данных АИС в соответствии с МППСС-72 [1]. Однако развитие автономных судов ставит задачу автоматизации процесса, что требует разработки эффективных алгоритмов, работающих реальном времени.

Самостоятельное принятие решений по предотвращению столкновений является ключевой задачей автономного судоходства. В последние годы наблюдается взрывной рост исследований в этой области. Однако в большинстве работ не учтены маневренные характеристики судна, не рассмотрено соблюдение МППСС-72 и не проведено рассмотрение широкого спектра сценариев применения предложенных алгоритмов.

Цель работы – систематизировать и сравнить основные методы расходжения автономных судов, оценить их применимость с учетом требований МППСС-72, динамических ограничений и вычислительных ресурсов бортовых систем.

Постановка задачи

Задача расходжения автономного судна может быть сформулирована следующим образом: при следовании по заданному маршруту судно должно обнаружить препятствие, построить безопасный маршрут обхода, выполнить маневр и вернуться на исходную траекторию. При этом должны соблюдаться следующие условия:

Минимальная дистанция до препятствия должна быть не менее заданного безопасного расстояния.

Маневр должен соответствовать правилам МППСС-72.

Траектория должна учитывать инерционность судна и ограничения на минимальный радиус поворота.

Время планирования должно быть приемлемым для работы в реальном времени.

Теория

Методы планирования маршрута делятся на три группы.

Графовые методы, к которым относятся алгоритмы Дейкстры [2] и A^* [3], требуют предварительного построения графа и плохо учитывают динамику судна, но гарантируют нахождение оптимального пути, если он возможен. Метрики методов напрямую зависят от того, как был построен граф, то есть от способа организации пространства. Примерами такой организации могут служить граф Видимости [4] и диаграмма Вороного [5].

Реактивные методы не требуют дискретизации, к ним относятся методы скоростных препятствий [6], динамического окна [7], искусственных потенциальных полей [8]. Такие методы как правило очень быстрые, но имеют свои недостатки, которые могут мешать нахождению маршрута. Например, широко используются модификации алгоритма искусственных потенциальных полей [9] для устранения проблемы преждевременного завершения работы в локальных минимумах.

Обучающиеся алгоритмы [10], к которым относятся генетические алгоритмы, а также обучение с подкреплением, зачастую находят эффективные стратегии построения маршрута, но требуют много данных и могут быть ненадежны.

Результаты моделирования

Моделирование выполнялось на компьютере со следующими характеристиками: процессор – 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12400F; оперативная память – DDR5 16.0 ГБ 4800 МГц; видеокарта – NVIDIA GeForce RTX 4060. Алгоритмы реализованы на языке Python версии 3.14 с использованием библиотек NumPy для вычислений и Matplotlib для визуализации.

Входными данными для алгоритмов глобального планирования служила статическая карта навигационных опасностей, представленных в виде полигональных препятствий. Для локального планирования симулировалось движение одной или нескольких динамических целей с заданными векторами скорости, соответствующими типичным сценариям расхождения в узкостях. Выходными данными являлись построенные маршруты.

Для построения картографической основы использовались тайлы сервиса Яндекс.Карт (YandexTileMap API) [11]. На основе полученных растровых данных самостоятельно выполнено автоматическое построение полигональных препятствий. Все алгоритмы расхождения реализованы и визуализированы самостоятельно на языке Python.

Оценка производилась по следующим метрикам: длина сгенерированного пути, время вычисления маршрута и качество учета динамических ограничений. Каждый эксперимент проводился 20 раз для усреднения результата с целью исключения флуктуаций.

На основе экспериментальных данных, полученных при реализации алгоритмов, проведен сравнительный анализ ключевых метрик. Сравнение ряда методов планирования проводилось на участке карты в районе Приморска (рис. 1). Для остальных методов сравнение проводилось на участке карты клуба «Балтиец», для которого характерны узкости (рис. 2). Рисунки представляют собой скриншоты интерфейса разработанного программного модуля на Python. Визуализация траекторий и препятствий выполнена средствами библиотеки Matplotlib.

В морском судоходстве выделяют два уровня планирования маршрута – глобальное и локальное [12]. Выбор двух локаций объясняется тем, что прямое сравнение, например, методов A^* и VO было бы некорректным, поскольку они решают разные задачи с этой точки зрения.

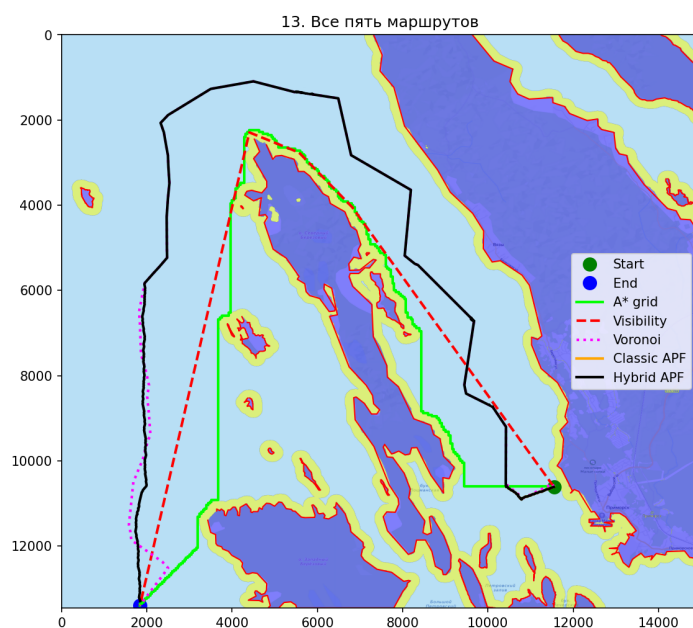


Рис. 1. Маршруты, построенные алгоритмами A* и APF

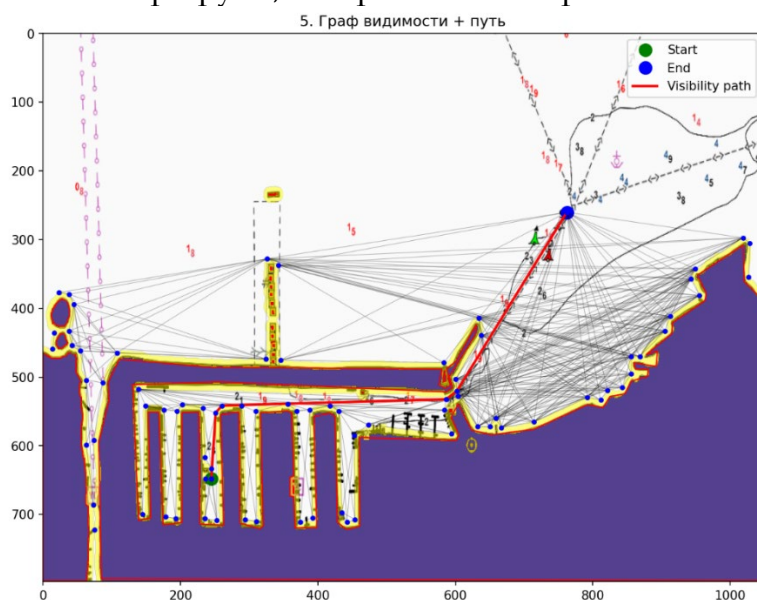


Рис. 2. Предварительно построенный глобальный маршрут для дальнейшего локального планирования (выделен красным цветом)

Результаты сведены в таблицу ниже.

Сравнительный анализ методов

Методы глобального планирования			
Критерий	A* на графе видимости	A* на диаграмме Вороного	Гибридный метод APF
Длина пути	22535.80	29292.66	30430.72
Время планирования	1.379	1.492	1.614
Методы локального планирования			
Критерий	Гибридный метод APF	VO	DWA
Время планирования	< 120 мс	0.5–3 с	0.1–0.5 с
Учет динамики	Параметрически	Да	Да

Учет МППСС-72	Вирт. препятствия	Формально	Формально
---------------	-------------------	-----------	-----------

Граф видимости обеспечивает кратчайший путь и минимальное время построения, что делает его предпочтительным для глобального планирования. Диаграмма Вороного, хотя и дает более длинный путь, гарантирует максимальное удаление от препятствий и рекомендуется для маршрутов в сложных районах.

Гибридный APF показывает лучшее время планирования среди локальных методов, что критично для систем реального времени. Такой результат достигается за счет предварительного вычисления карты потенциалов и диаграммы Вороного. При этом проблема локальных минимумов устранена за счет переключения на A^* по Вороному. Методы VO и DWA лучше учитывают динамику, но требуют больше вычислительных ресурсов.

Обсуждение результатов

Проведенный анализ позволяет сформулировать рекомендации по выбору методов расхождения. Для глобального планирования предпочтительным является A^* на графе видимости благодаря оптимальной длине пути. При необходимости повышения безопасности следует использовать диаграмму Вороного. Для локального планирования гибридные методы на основе APF являются оптимальным решением, сочетающим высокое быстродействие с гарантией достижения цели. Метод хорошо интегрируется с логикой МППСС-72. В сценариях с высокой плотностью движения и необходимостью точного учета динамики целесообразно применение методов VO или DWA, однако следует учитывать их более высокие вычислительные требования. Обучающиеся методы перспективны для сложных сценариев, но требуют дальнейшей проработки вопросов надежности и определенности поведения.

Выводы и заключение

В работе выполнен обзор и сравнительный анализ методов расхождения автономных надводных судов. Рассмотрены три основные группы алгоритмов: методы на графах, реактивные методы и обучающиеся алгоритмы. Были даны практические рекомендации по применению алгоритмов на основе их сильных и слабых сторон.

В отличие от известных обзоров, в данной работе впервые выполнен совместный анализ методов глобального и локального планирования на единой методологической основе с разделением по уровням навигации, а также с учётом специфики МППСС-72 и ограничений бортовых вычислителей.

Важно отметить, что ни один из рассмотренных методов не является универсальным. Более того необходимо дальнейшее совершенствование существующих алгоритмов в области учета возмущений среды, а также проведение испытаний на действующих судах.

Список литературы:

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море, 1972 г. (МППСС-72). — Москва, 2023. — 110 с.
2. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs // Numerische Mathematik. — 1959. — Vol. 1. — P. 269–271.
3. Басараб М. А., Домрачева А. Б., Купляков В. М. Алгоритмы решения задачи быстрого поиска пути на географических картах // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — № 11 (23). — 10 с. — DOI 10.18698/2308-6033-2013-11-1054.
4. Ghosh S. K. Visibility graphs // Visibility algorithms in the plane. — Cambridge University Press, 2007. — Chapter 5. — P. 111–145.

5. Киселева Е. М., Коряшкина Л. С. Теория непрерывных задач оптимального разбиения множеств как универсальный математический аппарат построения диаграммы Вороного // Кибернетика и системный анализ. — 2015. — Т. 51, № 3. — С. 3–15.
6. Pushkarev I. I. A control system for movement and divergence of unmanned ship according to COLREG // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14, № 6. — С. 837–848. — DOI 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848.
7. Hu S., Tian S., Zhao J., Shen R. Path planning of an unmanned surface vessel based on the improved A-star and dynamic window method // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11, № 5. — P. 1060. — DOI 10.3390/jmse11051060.
8. ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. Метод потенциалов в задаче выбора пути URL: https://www.keldysh.ru/papers/2001/prep40/prep2001_40.html (дата обращения: 27.06.2026).
9. Lyu H., Yin Y. COLREGS-constrained real-time path planning for autonomous ships using modified artificial potential fields // Journal of Navigation. — 2018. — Vol. 71, № 5. — P. 1158–1176.
10. Баракат Л. А., Квятковская И. Ю. Планирование безопасных маршрутов безэкипажных судов на основе методов искусственного интеллекта // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2023. — № 3. — С. 46–54.
11. Яндекс.Карты: Tiles API. — URL: <https://yandex.ru/maps-api/products/tiles-api> (дата обращения: 27.06.2026).
12. Vagale A., Oucheikh R., Bye R. T. Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: a review // Journal of Marine Science and Technology. — 2021. — P. 1292–1306.

References:

1. International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREG-72). Moscow, 2023. 110 p.
2. Dijkstra, E. W. "A note on two problems in connexion with graphs." Numerische Mathematik, 1959, vol. 1, pp. 269–271.
3. Basarab M. A., Domracheva A. B., Kuplyakov V. M. Algorithms for solving the problem of fast pathfinding on geographical maps // Engineering Journal: Science and Innovation. - 2013. - No. 11 (23). - 10 p. - DOI 10.18698/2308-6033-2013-11-1054.
4. Ghosh, S. K. "Visibility graphs." In Visibility Algorithms in the Plane, chapter 5. Cambridge University Press, 2007, pp. 111–145.
5. Kiseleva, E. M., and Koryashkina, L. S. "Theory of continuous problems of optimal set partitioning as a universal mathematical apparatus for constructing Voronoi diagrams." Cybernetics and Systems Analysis, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 3–15.
6. Pushkarev, I. I. "A control system for movement and divergence of unmanned ship according to COLREG." Bulletin of Admiral S. O. Makarov State University of Maritime and

- Inland Shipping, 2022, vol. 14, no. 6, pp. 837–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848.
7. Hu, S., Tian, S., Zhao, J., and Shen, R. "Path planning of an unmanned surface vessel based on the improved A-star and dynamic window method." *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, vol. 11, no. 5, p. 1060. DOI: 10.3390/jmse11051060.
 8. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. "The potential method in the path selection problem." Available at: https://www.keldysh.ru/papers/2001/prep40/prep2001_40.html (accessed: 27.06.2026).
 9. Lyu, H., and Yin, Y. "COLREGS-constrained real-time path planning for autonomous ships using modified artificial potential fields." *Journal of Navigation*, 2018, vol. 71, no. 5, pp. 1158–1176.
 10. Barakat, L. A., and Kvyatkovskaya, I. Yu. "Planning of safe routes for unmanned vessels based on artificial intelligence methods." *ASTU Bulletin. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2023, no. 3, pp. 46–54.
 11. Yandex.Maps: Tiles API. — URL: <https://yandex.ru/maps-api/products/tiles-api> (дата обращения: 27.06.2026).
 12. Vagale, A., Oucheikh, R., and Bye, R. T. "Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: a review." *Journal of Marine Science and Technology*, 2021, pp. 1292–1306.