

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-485-492

ASSESSMENT OF THE VESSEL POSITION DEAD RECKONING METHOD ERROR

V. V. Deryabin

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

A method of the calculation of vessel dead reckoning coordinates with the accuracy assessment is proposed. It is based on previously derived formulas for the assessment of the uncertainty boundaries for vessel geodetic latitude and longitude during its motion along the ellipsoid surface. The above formulas are used as follows. At first, the latitude and its precision index are calculated. After, they are used for the calculation of the longitude and its precision index. As the result, it is possible to determine uncertainty intervals for vessel coordinates derived with dead reckoning. The implementation of this method for testing an electronic chart display and information system Navi-Sailor 4000 as to the calculation of vessel dead reckoning coordinates with it is shown. The provision of the information about vessel heading and speed through water is carried out to the system in real-time mode by means of a signal simulator. The speed and heading are remaining unchanged during one-hour time interval. During the above time interval, the data about dead reckoning coordinates are recording into a log-file, then the data are converted in a text format and used for the test. The dead reckoning coordinates, calculated by the system, are in the limits of uncertainty assessed with the proposed method. A limitation of the method is that it does not take into account the influence of errors due to rounding because of the finiteness of the computer bit grid. After the elimination of the above limitation, it seems to be possible to use a modernized version of the method as a part of a procedure for testing the navigational systems which give the information about vessel dead reckoning coordinates.

Keywords: vessel, latitude, longitude, dead reckoning, interval calculations, testing, ECDIS.

For citation:

Deryabin, Victor V. "Assessment of the vessel position dead reckoning method error." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.4 (2024): 485–492. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-485-492.

УДК 656.61:528.236.1

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА СЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ СУДНА

В. В. Дерябин

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

Предложен метод расчета счислимых координат судна с оценкой их точности, в основе которого находятся формулы оценок границ промежутков неопределенности для геодезической широты и долготы судна при движении его вдоль поверхности эллипсоида. Указанные формулы используются в следующем порядке: сначала рассчитываются значение широты и оценка ее точности, которые затем используются для расчета долготы и оценки ее точности. В итоге имеется возможность оценить границы области неопределенности координат судна, полученных по счислению. Продемонстрировано применение данного метода для тестирования электронной картографической навигационной информационной системы Navi-Sailor 4000 в части выработки ею счислимых координат судна. При помощи имитатора сигналов в режиме реального времени организована подача системе информации о курсе и скорости судна относительно воды, удерживаемых постоянными в течение часа. В продолжение указанного периода времени данные о счислимых координатах были записаны в файл-журнал, после чего они были конвертированы в текстовый

вид и использовались для тестирования. Счислимые координаты, выдаваемые системой, оказались в пределах областей неопределенностей, полученных при помощи предлагаемого метода. Ограничением метода является то, что он не учитывает влияние ошибок, возникающих в результате округления чисел в компьютере, вызванное ограниченностью размера его разрядной сетки. После устранения указанного недостатка представляется возможным использование модернизированной версии метода в составе процедуры тестирования навигационных систем, отвечающих за выработку информации о счислимых координатах судна.

Ключевые слова: судно, широта, долгота, счисление, интервальные вычисления, тестирование, ЭКНИС.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Оценка погрешности метода счисления координат судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 485–492. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-485-492.

Введение (Introduction)

Спутниковые навигационные системы позволяют получать координаты и скорость судна с высокой степенью точностью и практически непрерывно во времени, но им присущ один существенный недостаток — *неавтономность*, т. е. зависимость от внешних измерений. В противоположность им счисление позволяет определять координаты судна в автономном режиме, но его точность с течением времени снижается. Электронные картографические навигационные информационные системы (ЭКНИС), являющиеся обязательными для установки на судах определенного типа и вместимости в соответствии с требованиями конвенции СОЛАС¹, имеют подключение к датчикам скорости и курса судна, на основе которых и выполняется счисление. Как сертифицированное оборудование ЭКНИС проходит обязательную проверку на соответствие требованиям стандарта МЭК 61174², который содержит тестовые сценарии для проверки ее важнейших функций (например, функции создания маршрута). К сожалению, в тексте указанного стандарта отсутствуют требования к проверке функциональности в части расчета счислимых координат судна, т. е. процедура проверки правильности ведения счисления в ЭКНИС не регламентирована. Несмотря на то, что потребность в подобном алгоритме тестирования является необходимой, в настоящее время общепризнанных алгоритмов тестирования режима счисления в ЭКНИС не существует.

Вопросам исследования точности счисления пути посвящено относительно немного работ, по сравнению с исследованиями, например, в области использования средств спутниковой навигации. В сфере морской навигации для судов торгового флота подобных современных исследований еще меньше и более фундаментальные работы в данной области относятся к периоду, предшествующему массовому использованию спутниковых технологий. Среди работ по навигационному счислению пути надводных морских подвижных или движущихся вблизи поверхности Земли объектов известны исследования [1]–[3]. В области инерциального счисления подвижных объектов работ значительно больше (см., например, [4]–[6]). Среди англоязычных источников по счислению можно отметить исследования [7]–[9]. В работе [10] рассмотрены вопросы оценки точности как навигационного, так и инерциального счисления. Общим для указанных исследований является то, что в них не ставится конечная задача тестирования автономной навигационной системы в плане адекватности расчета определения счислимых координат, что необходимо, в частности, для проверки ЭКНИС. Как правило, речь идет об оценке точности счисления в условиях инструментальных ошибок или погрешностей, связанных с учетом внешних факторов (ветер, течение).

Настоящее исследование является продолжением работ [11], [12], в которых выведены формулы, позволяющие оценить погрешность методов определения геодезической широты и долготы судна при помощи гарантированных интервальных оценок. Для оценки области неопределенно-

¹ Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 года. СПб: АО ЦНИИМФ, 2021. 1184 с.

² IEC 61174 (ed. 4). Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems — Electronic chart display and information system (ECDIS) — Operational and performance requirements, methods of testing and required test results). Geneva: IEC, 2015. 84 p.

сти судна на поверхности общеземного эллипсоида необходимо разработать алгоритм, определяющий порядок использования полученных ранее аналитических выражений для оценки точности каждой из координат в отдельности. Данный вопрос исследован в настоящей статье.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи счисления. Пусть на поверхности общеземного эллипсоида с большой полуосью a и эксцентриситетом e движется судно с координатами $\varphi(t), \lambda(t)$ — геодезической широтой и долготой как функциями времени t . Высоту над поверхностью эллипсоида h будем считать постоянной и не зависящей от времени t величиной. Дифференциальные уравнения движения судна могут быть записаны в следующем виде [13]:

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= \frac{V_N}{M}; \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{V_E}{N \cos \varphi},\end{aligned}\quad (1)$$

где V_N и V_E — соответственно северная и восточная компоненты абсолютной скорости судна;

M, N — соответственно радиус кривизны меридиана и первого вертикала (главные радиусы кривизны).

Система дифференциальных уравнений (1) не имеет до сих пор точного аналитического решения, поскольку радиусы кривизны представляют собой сложные зависимости от широты, препятствующие получению аналитического решения. Для получения приближенного решения $\tilde{\varphi}(t), \tilde{\lambda}(t)$ могут применяться различные методы, но использование каждого из них обязательно будет сопровождаться определенной погрешностью. Для оценки сверху модулей погрешностей координат используются числа A_φ, A_λ — предельные абсолютные ошибки.

Метод счисления пути. В работах [11], [12] выведены формулы, в соответствии с которыми приближенные значения широты и долготы судна определяются следующим образом:

$$\tilde{\varphi}(t) = \varphi(0) + \frac{q_{\max}}{(a+h)(1-e^2)} \int_0^t V_N(t) dt; \quad (2)$$

$$\tilde{\lambda}(t) = \lambda(0) + \frac{1}{a+h} \int_0^t \left[\sqrt{1-e^2 \sin^2 \tilde{\varphi}} / \cos \tilde{\varphi} \right] V_E(t) dt. \quad (3)$$

Здесь $q_{\max} = \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min |\varphi|))^3}$, где $\min |\varphi|$ — минимально возможное абсолютное значение широты, предполагаемое в процессе движения судна.

При расчете широты и долготы по формулам (2) и (3) их предельные абсолютные погрешности определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}A_\varphi &= \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \left(\sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min |\varphi|))^3} - \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\max |\varphi|))^3} \right) \times \\ &\times \max |V_N(t)| \cdot t;\end{aligned}\quad (4)$$

$$A_\lambda = A_\varphi \frac{(1-e^2)}{a+h} \frac{\sin(\max |\varphi|)}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 (\max |\varphi|)} \cdot \cos^2 (\max |\varphi|)} \max |V_E(t)| t, \quad (5)$$

где $\max |\varphi| < 90^\circ$, $\max |V_N(t)|, \max |V_E(t)|$ — наибольший модуль широты и составляющих скорости судна за время плавания t соответственно.

Следует отметить два обстоятельства, связанных с использованием соотношений (4) и (5). Первое заключается в том, что они не могут использоваться в приполярных районах, так как для них знаменатель формулы (5) близок к нулю. Второе состоит в том, что погрешность

долготы зависит от погрешности широты, что, в принципе, логично вытекает из способа ее расчета в соответствии с выражением (3).

Формулы (2)–(5) позволяют выполнить приближенные расчеты геодезической широты и долготы судна с оценкой их точности в виде гарантированных интервалов, в пределах которых истинные значения будут находиться достоверно. Это может быть использовано для тестирования навигационных алгоритмов, используемых, например, в ЭКНИС.

Как известно, составляющие абсолютной скорости судна могут быть выражены через его путевой угол (ПУ) и абсолютную скорость V следующим образом: $V_N = V \cos \text{ПУ}$, $V_E = V \sin \text{ПУ}$. Если V и ПУ постоянны во времени, то и подынтегральные выражения в (2) и (3) не зависят от времени (для выражения (3) необходимо также постоянство приближенного значения широты) и их можно вынести за знак интеграла. Действительно, в данном случае получим следующие рабочие выражения:

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi}(t) &= \varphi(0) + \frac{q_{\max} V_N t}{(a+h)(1-e^2)}; \\ \tilde{\lambda}(t) &= \lambda(0) + \frac{V_E t \sqrt{1-e^2} \sin^2 \tilde{\varphi} / \cos \tilde{\varphi}}{a+h}.\end{aligned}\quad (6)$$

Данные соотношения будем использовать далее в составе алгоритма оценки точности счисления.

Алгоритм оценки точности счисления. Данный алгоритм описывается следующим образом:

1. Назначаются начальные параметры: характеристики эллипсоида (a , e), высота h , $\min |\varphi|$, $\max |\varphi|$, $\max |V_N(t)|$, $\max |V_E(t)|$, общее время плавания T .
2. Устанавливаются параметры тестовой навигационной ситуации: начальные координаты $\varphi(0)$, $\lambda(0)$, путевой угол ПУ и абсолютная скорость V .
3. Для каждого момента времени t из промежутка $[0; T]$ рассчитываются:
 - приближенное значение широты $\tilde{\varphi}(t)$ и предельная погрешность $A_\varphi(t)$;
 - приближенное значение долготы $\tilde{\lambda}(t)$ и предельная погрешность $A_\lambda(t)$.
4. Для каждого момента времени t определяются левая и правая границы промежутков неопределенности широты и долготы, т. е. $[\tilde{\varphi}(t) - A_\varphi(t); \tilde{\varphi}(t) + A_\varphi(t)]$ и $[\tilde{\lambda}(t) - A_\lambda(t); \tilde{\lambda}(t) + A_\lambda(t)]$.
5. Для каждого t устанавливается принадлежность счисляемых координат тестируемого алгоритма указанным в пп. 4 промежуткам.

При выполнении тестирования скорость V принимается, как правило, равной скорости судна по лагу, а ПУ — курсу судна, полученному по информации от гирокомаса. Указанное обстоятельство может показаться, на первый взгляд, странным, но поскольку речь идет о проверке вычислительных способностей тестируемого алгоритма в конкретной навигационной системе, для счисления без учета внешних факторов такой вариант представляется вполне приемлемым. В случае, если необходимо учитывать внешние факторы, то V и ПУ могут использоваться уже непосредственно. Кроме того, многое зависит от интерфейса навигационной системы, т. е. от того, какие данные используются для счисления.

Результаты (Results)

Для проверки применимости предлагаемого алгоритма было выполнено следующее. ЭКНИС Navi-Sailor 4000 была переведена в такой режим работы, когда единственной и основной системой определения места судна является система счисления (DR — Dead Reckoning). При помощи имитатора сигналов на вход ЭКНИС были поданы данные от воображаемого лага и гирокомаса, т. е. относительная скорость $STW = 15$ уз и курс $HDG = 45^\circ$, которые оставались неизменными в течение часа плавания. Начальные координаты были установлены $\varphi(0) = \lambda(0) = 0$. В продолжение часа плавания была записана траектория движения судна, точнее она автоматически сохранялась в файл. Обработкой указанного файла были получены моменты времени и значения координат для них. Параметры, необходимые для работы алгоритма были установлены следующим образом:

- параметры эллипсоида: $a = 6378137$ м, $e^2 = 0,006694379990141$;
- высота движения над ним: $h = 0$, т. е. судно движется по поверхности эллипсоида;
- максимальные модули составляющих скорости: $\max|V_N| = \max|V_E| = 30$ уз.
- наименьший модуль широты $\min|\varphi| = 0$; наибольший модуль широты $\max|\varphi| = 85^\circ$.

Алгоритм реализован в среде вычислений Scilab 6.1.1. Результаты представлены в виде следующей таблицы.

Результаты тестирования модуля счисления ЭКНИС

Счислимые координаты	Моменты времени плавания, мин				
	10	20	30	50	60
Верхняя граница широта / долгота, '	1,826/1,774	3,653/3,567	5,479/5,379	9,132/9,060	10,959/10,929
Нижняя граница широта / долгота, '	1,727/1,755	3,453/3,491	5,180/5,208	8,633/8,586	10,359/10,246
Расчетное (среднее) значение широта / долгота, '	1,776/1,765	3,553/3,529	5,329/5,294	8,882/8,823	10,659/10,588
ЭКНИС-значение широта / долгота, '	1,774/1,762	3,552/3,528	5,332/5,296	8,884/8,824	10,658/10,587

Графики зависимости расчетной широты от времени, а также соответствующих границ областей неопределенности представлены на рисунке.

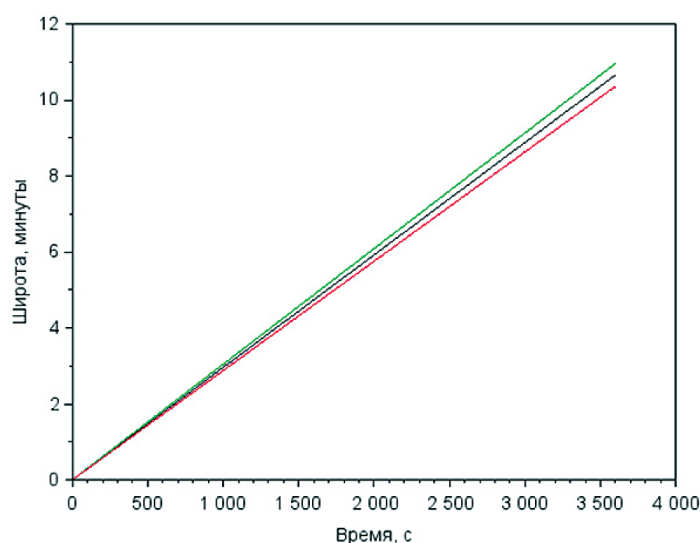


График зависимости широты от времени

Верхняя кривая ограничивает область неопределенности широты сверху, нижняя — снизу, средняя линия соответствует значению, рассчитанному по формуле из выражений (6). Если значение широты, генерируемое ЭКНИС в режиме счисления, выходит за границы указанной области неопределенности, то тест считается не пройденным. Аналогичный график может быть выполнен и для долготы судна. Более того, представляется возможным построить график движения судна в горизонтальной плоскости (например, широты от долготы), что позволит наглядно оценивать динамику развития области неопределенности, в которой находится судно при использовании счисления в качестве метода определения своего местоположения.

Обсуждение (Discussion)

Результаты тестирования ЭКНИС, представленные в табличном виде, показывают, что в данном тест-сценарии рассматриваемая ЭКНИС успешно проходит тестирование в части обеспечения

навигационной информации, касающейся определения координат места судна в режиме счисления. Значения широты и долготы, генерируемые ЭКНИС, находятся внутри промежутков неопределенности, рассчитанных аналитическим путем. Сравнение было выполнено для дискретных моментов времени, для которых определялись значения координат в ЭКНИС. По крайней мере, для указанных моментов тест считается пройденным.

Приведенная таблица содержит также рассчитанные по формулам (6) значения координат, которые равны средним значениям между верхними и нижними оценками промежутков неопределенности. Как видно из таблицы, для моментов времени 10 мин и 20 мин значения, выдаваемые ЭКНИС, находятся ближе к нижней границе области неопределенности, для моментов времени 30 мин и 50 мин — ближе к верхней границе. Для конца промежутка времени плавания (60 мин) значения также меньше среднего, т. е. ближе к нижней границе неопределенности. Следует отметить, что указанные отклонения от среднего наблюдаются, как правило, в третьем знаке дробной части. С учетом этого, а также того, что данные в таблице представлены в округленном виде, они вряд ли могут рассматриваться как значительные. Тем не менее существующие отличия указывают на то, что расчет счислимых координат в рассматриваемой ЭКНИС не ведется в точности по формулам (6).

Существенным ограничением данного метода тестирования режима счисления в ЭКНИС является то, что он не учитывает погрешности, возникающие в ходе вычислений, точнее — погрешности округлений. В любом случае расчеты по формулам (6) связаны с округлениями величин. Рассмотрим, например, формулу расчета широты. Если допустить, что $\min|\varphi| = 0$, то $q_{\max} = 1$, и числитель $q_{\max} V_N t = V_N t$ по меньшей мере для целочисленных значений скорости и времени представляется точным числом. При делении его на $(a + h)(1 - e^2)$ нет гарантии, что в результате будет получено число, полностью помещающееся в разрядной сетке компьютера, т. е. возможны погрешности округления. Расчетное значение широты используется для определения долготы, поэтому последнее также будет в общем случае подвержено влиянию ошибок округления. Более того, указанное является справедливым также для оценок точности A_φ, A_λ . Ошибки округления увеличивают области неопределенности координат, но если тестируемая ЭКНИС (или другая навигационная система) выдает значения, попадающие в области неопределенности без учета округлений (подтверждено в рассмотренном примере), то данный результат считается положительным. При этом без оценки погрешностей округлений можно всегда сослаться на них, если решение тестируемой системы выходит за границы области неопределенности.

Заключение (Conclusion)

Проведенное исследование показало возможность использования аппарата интервальной математики для тестирования навигационных систем, вырабатывающих параметры в виде счислимых координат. На примере реальной ЭКНИС выполнена практическая реализация предлагаемого алгоритма. Оценка не базируется на теории вероятности, она имеет детерминированный характер, позволяющий точно определить, находится судно в точке или нет. В связи с этим отсутствует необходимость в обосновании выбора закона распределения и его параметров, что не всегда просто сделать при вероятностном подходе. Следует отметить, что алгоритм не производит оценку точности счисления в условиях влияния ошибок исходных данных (инструментальных, влияние внешних факторов), а только рассчитывает координаты в виде оценок их границ, в пределах которых гарантированно может находиться судно (пока без учета ошибок округления). Иными словами, определен метод решения дифференциальных уравнений счисления на эллипсоиде с оценкой ошибок, возникающих в результате его применения, что позволяет получить области неопределенности координат. Параметры предлагаемого метода не зависят от технических средств, при помощи которых ведется счисление, и параметров конкретного судна.

В качестве направлений дальнейшего исследования первоочередной задачей является доработка предлагаемого метода в плане учета ошибок округления, возникающих при расчете оценок координат и их предельных ошибок. Только после подобной доработки можно давать гарантированную оценку границ области неопределенности местоположения и делать вывод о применимо-

сти метода для тестирования навигационного оборудования. Также перспективным представляется направление, связанное с разработкой полноценной процедуры проверки работоспособности ЭКНИС, включающей тестовые сценарии, а также доработанный с учетом погрешностей округления метод. Указанная процедура может быть включена в текст стандарта МЭК, устанавливающего требования к ЭКНИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каврайский А. В. Алгоритмы точного решения прямой и обратной навигационных задач / В. А. Каврайский // Навигация и гидрография. — 2002. — № 14. — С. 126–136.
2. Пантелеев Н. Ф. Счисление геодезических координат B , L , h для объектов, движущихся по поверхности Земли / Н. Ф. Пантелеев, В. В. Кузнецов, А. Г. Глазков, А. А. Власова // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. — 2010. — № 1. — С. 69–72.
3. Соколов А. Ю. Методы оценивания течений в задаче автономного навигационного счисления / А. Ю. Соколов, А. В. Моторин // Подводные исследования и робототехника. — 2021. — № 1 (35). — С. 41–50. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_04.
4. Голован А. А. Метод анализа влияния погрешностей гироскопического канала бесплатформенной инерциальной навигационной системы на погрешности инерциального счисления / А. А. Голован, В. Ю. Мишин, А. В. Молчанов, М. В. Чиркин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2021. — Т. 4. — № 4. — С. 130–141. DOI: 10.31857/S0002338821040041.
5. Кикин И. С. Автономная коррекция одноканальной системы инерциального управления / И. С. Кикин // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2020. — Т. 17. — № 11 (197). — С. 3–12. DOI: 10.14489/vkit.2020.11. pp.003-012.
6. Бабиченко А. В. К вопросу обеспечения точности математического моделирования бесплатформенных инерциальных систем / А. В. Бабиченко, А. В. Некрасов, Н. В. Бородаев, О. А. Бородаева // Автоматизация. Современные технологии. — 2021. — Т. 75. — № 3. — С. 126–135.
7. Skulstad R. Dead reckoning of dynamically positioned ships: Using an efficient recurrent neural network / R. Skulstad, G. Li, T. I. Fossen, B. Vik, H. Zhang // IEEE Robotics & Automation Magazine. — 2019. — Vol. 26. — Is. 3. — Pp. 39–51. DOI: 10.1109/MRA.2019.2918125.
8. Sokolov A. Estimation of log dead reckoning error induced by tidal currents / A. Sokolov, A. Motorin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 984. — No. 1. — Pp. 012008. DOI: 10.1088/1757-899X/984/1/012008.
9. Qiu B. Development of hybrid neural network and current forecasting model based dead reckoning method for accurate prediction of underwater glider position / B. Qiu, M. Wang, H. Li, L. Ma, X. Li, Z. Zhu, F. Zhou // Ocean Engineering. — 2023. — Vol. 285. — Pp. 115486. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115486.
10. Михальский В. А. Метрология в кораблевождении и решение задач навигации: моногр. / В. А. Михальский, В. А. Катенин. — СПб.: Элмор, 2009. — 288 с.
11. Дерябин В. В. Оценка погрешности метода счисления долготы судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 430–438. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-430-438.
12. Дерябин В. В. Оценка погрешности метода счисления широты судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1159–1167. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167.
13. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации: моногр. / П. В. Бромберг. — М.: Наука, 1979. — 294 с.

REFERENCES

1. Kavraisky, A. V. "Algorithms for Precise Solution of the Direct and Inverse Navigation Problems." *Navigation and hydrography* 14 (2002): 126–136.
2. Panteleev, N. F. V. V. Kuznetsov, A. G. Glazkov, and A. A. Vlasova. "Schislenie geodezicheskikh koordinat B , L , h dlya ob"ektov, dvizhushchikhsya po poverkhnosti Zemli." *Trudy FGUP "NPTsAP". Sistemy i pribory upravleniya* 1 (2010): 69–72.

3. Sokolov, A. U., and A. V. Motorin. "Sea currents estimation methods for the dead reckoning." *Underwater Investigations and Robotics* 1(35) (2021): 41–50. DOI: 10.37102/1992-4429_2021_35_01_04.
4. Golovan, A. A., V. Y. Mishin, M. V. Chirkin, and A. V. Molchanov. "Method for analyzing the influence of the errors induced by the gyroscopic channel of a strapdown ins in the autonomous mode." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 60.4 (2021): 627–638. DOI: 10.1134/S1064230721040043.
5. Kikin, I.S. "Autonomous correction of a single-channel inertial control system." *Herald of computer and information technologies* 17.11(197) (2020): 3–12. DOI: 10.14489/vkit.2020.11.pp.003-012.
6. Babichenko, A. V., A. V. Nekrasov, N. V. Borodaev, and O. A. Borodaeva. "On the issue of the accuracy ensuring of mathematical modeling of without platform inertial systems." *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* 75.3 (2021): 126–135.
7. Skulstad, Robert, Robert Skulstad, Guoyuan Li, Thor I. Fossen, Bjornar Vik, and Houxiang Zhang. "Dead reckoning of dynamically positioned ships: Using an efficient recurrent neural network." *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26.3 (2019): 39–51. DOI: 10.1109/MRA.2019.2918125.
8. Sokolov, A., and A. Motorin. "Estimation of log dead reckoning error induced by tidal currents." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 984. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/984/1/012008.
9. Qiu, Baochun, Maofa Wang, Houwei Li, Li Ma, Xiuquan Li, Zefei Zhu, and Fan Zhou. "Development of hybrid neural network and current forecasting model based dead reckoning method for accurate prediction of underwater glider position." *Ocean Engineering* 285 (2023): 115486. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115486.
10. Mikhal'skii, V. A., and V. A. Katenin. *Metrologiya v korablevozhdenii i reshenie zadach navigatsii*. SPb.: Elmor, 2009.
11. Deryabin, Victor V. "The assessment of the vessel's longitude dead reckoning method error." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 430–438. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-430-438.
12. Deryabin, Victor V. "Assessment of a method error of dead reckoning of a vessel's latitude." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1159–1167. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167.
13. Bromberg, P. V. *Teoriya inertial'nykh sistem navigatsii*. M.: Nauka, 1979.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin, Victor 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: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2024 г.
Received: May 15, 2024.

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-493-506

USE OF NEURAL NETWORKS FOR SAFE COLLISION AVOIDANCE FOR GROUPS OF AUTONOMOUS VESSELS

O. Y. Tripolets

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

This article analyzes and compares the effectiveness of two algorithms for collision avoidance in groups of autonomous vessels: one based on geometric analysis of vessel approach and cost function minimization for calculating a safe maneuver (traditional algorithm), and an algorithm utilizing a neural network. Both algorithms assume external control of a group of vessels within a specific area using a vessel traffic management system and coordinated maneuvering of dangerously approaching vessels. Descriptions of these algorithms are provided along with their simplified block diagrams; to solve the task of safely maneuvering a group of vessels, a sequential analysis of all possible vessel pairs in the group and changes in their courses is proposed. The process of creating three test datasets is described, two of which were generated using a program and included 100 scenarios each, while the third was manually composed and included 30 scenarios for different vessel group approach variations. During the testing of the neural network algorithm, two neural networks trained to predict safe courses for vessel pairs were utilized. The neural network used in the algorithm, trained on 743671 samples, allowed the processing of test vessel approach scenarios with an accuracy comparable to the traditional algorithm. Depending on the number of dangerously approaching vessels in the area, the neural network algorithm processed test scenarios 2–14 times faster than the traditional algorithm. The paper highlights the limitations of the described algorithms and outlines planned improvements for subsequent research, including the optimization of the safe maneuver selection methodology and further training of the neural network on larger data volumes.

Keywords: collision avoidance, coordinated maneuvering, neural networks, MATLAB, autonomous shipping, group maneuvering, maneuvers calculation, neural network algorithm.

For citation:

Tripolets, Oleg Y. "Use of neural networks for safe collision avoidance for groups of autonomous vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 16.4 (2024): 493–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-493-506.

УДК 656.61.052

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ БЕЗОПАСНОГО РАСХОЖДЕНИЯ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ СУДОВ

О. Ю. Триполец

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

В статье проанализирована эффективность использования нейронных сетей для решения задачи безопасного расхождения группы автономных судов в море. Выполнено сравнение эффективности двух алгоритмов расхождения групп автономных судов: традиционного (на основе геометрического анализа сближения судов и минимизации функции стоимости для вычисления безопасного манёвра) и алгоритма с нейронной сетью. Оба алгоритма предполагают внешнее управление группой судов в определенной акватории с помощью системы управления движением судов и совместное маневрирование опасно сближающихся судов. Приведено описание этих алгоритмов и даны их упрощенные блок-схемы. Для решения задачи безопасного расхождения группы судов предлагается выполнять последовательный анализ всех возможных пар судов в группе и изменение их курсов. Выполнено описание процесса создания трех тестовых наборов данных, два из которых составлены с помощью программы и включали по 100 сценариев, третий, составленный человеком, и включал по 30 сценариев для разных вариантов сближения групп судов. В ходе тестирования нейросетевого алгоритма были использованы две нейронные сети, обученные прогнозированию безопасных курсов для пар судов. Используемая в алгоритме нейронная сеть, обученная на 743 671 образце,

позволила обработать тестовые сценарии сближения судов с точностью, сравнимой с традиционным алгоритмом. В зависимости от количества опасно сближающихся судов в акватории алгоритм с нейронной сетью справился с обработкой тестовых сценариев в 2–14 раз быстрее, чем традиционный. В работе отмечаются ограничения описанных алгоритмов, а также планируемые улучшения для последующих исследований, среди которых оптимизация методики выбора безопасных маневров, а также дообучение нейронной сети на основе более значительных объемов данных.

Ключевые слова: предотвращение столкновений, совместное маневрирование, нейронные сети, MATLAB, автономное судоходство, расхождение группы судов, расчет маневров, нейросетевой алгоритм.

Для цитирования:

Триполец О. Ю. Использование нейронных сетей для решения задачи безопасного расхождения группы автономных судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 4. — С. 493–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-4-493-506.

Введение (Introduction)

Разработка и внедрение беспилотных судов являются объектом пристального внимания исследователей [1]. В настоящее время Международная Морская Организация (ИМО) активно разрабатывает нормативно-правовую базу для регулирования эксплуатации морских автономных надводных судов (МАНС). На проводимых ИМО симпозиумах обсуждаются новейшие технологические достижения в области МАНС, возможности коммерциализации автономного судоходства и адаптация портов к этим технологиям [2]. К 2025 г. планируется принятие Кодекса МАНС в качестве рекомендательного (Maritime Autonomous Surface Ships Code — MASS Code), а к 2028 г. его положения станут обязательными. Этот кодекс будет регламентировать вопросы безопасной эксплуатации автономных судов и обеспечивать стандарты для предотвращения столкновений [3].

Для полноценного внедрения автономных судов в эксплуатацию необходимо решить ряд задач, включая обеспечение их безопасного расхождения в море. Множество исследований направлено на поиск решений этой проблемы [4]. В работах [5]–[7] рассматривается безопасное маневрирование автономных судов, их расхождение со статическими и динамическими препятствиями, а также с группами судов, однако они сосредоточены на расчете маневров или динамической перепланировке маршрута только для одного судна.

В исследованиях [8], [9] рассматривается вопрос безопасного расхождения групп автономных судов на основе их коллективного маневрирования. Работа [10] посвящена решению задачи группового маневрирования между автономными и традиционными судами с использованием многосудовой кооперативной сети и модели кооперативной игры, а также с помощью обобщенного алгоритма взаимных скоростных препятствий (Generalised Reciprocal Velocity Obstacle (GRVO) Algorithm). В исследованиях [11], [12] предлагается геометрическая интерпретация решения задачи расхождения группы судов (как автономных, так и традиционных) на акватории с интенсивным трафиком, при этом моделируются ситуации типа «судно – группа судов» и выполняется анализ возможных намерений других участников движения. В работах [13], [14] используется минимизация функции стоимости для расчета оптимального маневра расхождения агента со статическими и динамическими препятствиями. В работе [15] отмечаются достоинства внешнего управления судами через систему управления движением судов (СУДС) и перспективы его применения для предотвращения столкновений пар опасно сближающихся судов, особенно в районах плавания с интенсивным движением. Исследования [16], [17] показывают, что использование нейронных сетей (далее — НС) имеет ряд преимуществ по сравнению с применением традиционных алгоритмов в различных областях, в том числе при их использовании в морских системах предотвращения столкновений. В работе [18] отмечается, что интеграция нейронных сетей и нечеткой логики может значительно повысить безопасность морского движения за счет улучшения систем предотвращения столкновений.

В настоящей статье описываются алгоритмы предотвращения столкновений для группы автономных судов с перспективы СУДС, т. е. внешнего оператора, регулирующего движение в опре-

деленной акватории. Для прогнозирования маневров расхождения в ситуациях опасного сближения группы судов используются и сравниваются два алгоритма: на основе геометрического анализа сближения судов и минимизации функции стоимости (далее — традиционный алгоритм), и на основе нейронной сети (далее — алгоритм с НС).

Целью настоящего исследования является анализ и оценка эффективности этих алгоритмов в определении безопасных маневров расхождения групп автономных судов.

Задачи данного исследования:

1. Описать «традиционный» и «нейросетевой» алгоритмы вычисления новых курсов для совместного безопасного маневрирования групп автономных судов на основе минимизации функции стоимости и на основе использования нейронной сети.
2. Написать скрипт в программной среде MATLAB, позволяющий рассчитать безопасные курсы для расхождения групп автономных судов, для каждого из алгоритмов.
3. Провести тестирование и сравнить быстродействие и эффективность алгоритмов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Описание алгоритма расхождения группы судов на основе минимизации функции стоимости. В одной из работ автора [19] представлен подход к решению проблемы расхождения двух безэкипажных судов на основе геометрического анализа сближения судов и минимизации функции стоимости, а также описан скрипт, написанный в компьютерной среде MATLAB, позволяющий вычислять маневры для предотвращения столкновения двух судов. Этот скрипт анализирует информацию об опасно сближающихся судах и определяет наиболее подходящие изменения их скоростей и / или курсов путем минимизации функции стоимости (Cost Function) для обеспечения расхождения на заданной дистанции. Проведенные в программной среде MATLAB симуляции показали эффективность алгоритма при вычислении безопасных маневров. В настоящем исследовании указанный ранее подход был усовершенствован для возможности вычисления безопасных курсов для группы опасно сближающихся судов. Далее в статье будем называть этот подход и соответствующий ему алгоритм «традиционными». При наличии в одной акватории более двух судов маневрирование только одного или двух из них может привести к новым ситуациям опасного сближения, поэтому, согласно данному подходу, предполагается, что все суда, участвующие в опасном сближении, будут изменять свои курсы для безопасного расхождения. Так же, как и в работе [19], алгоритм, описанный в данной статье, позволяет вычислять новые курсы для пар судов, однако их скорости остаются неизменными.

Упрощенная блок-схема традиционного алгоритма расхождения группы судов представлена на рис. 1. Ситуацию сближения n судов в одной акватории настоящий алгоритм будет обрабатывать следующим образом: данные о всех судах в акватории собираются в матрицу T , количество столбцов N в которой равно количеству судов, а каждый столбец содержит x - и y -координаты каждого судна, их курсы и скорости. Матрица T разделяется на подмассивы X_i :

$$X_i := \begin{pmatrix} x_i & x_i & x_i \\ y_i & y_i & y_i \\ v_i & v_i & v_i \\ K_i & K_i & K_i \\ x_{i+1} & x_{i+2} & x_n \\ y_{i+1} & y_{i+2} & y_n \\ v_{i+1} & v_{i+2} & v_n \\ K_{i+1} & K_{i+2} & K_n \end{pmatrix},$$

где i — номер судна, с которым образуются все возможные пары в данной ситуации сближения;
 n — общее количество судов в акватории.

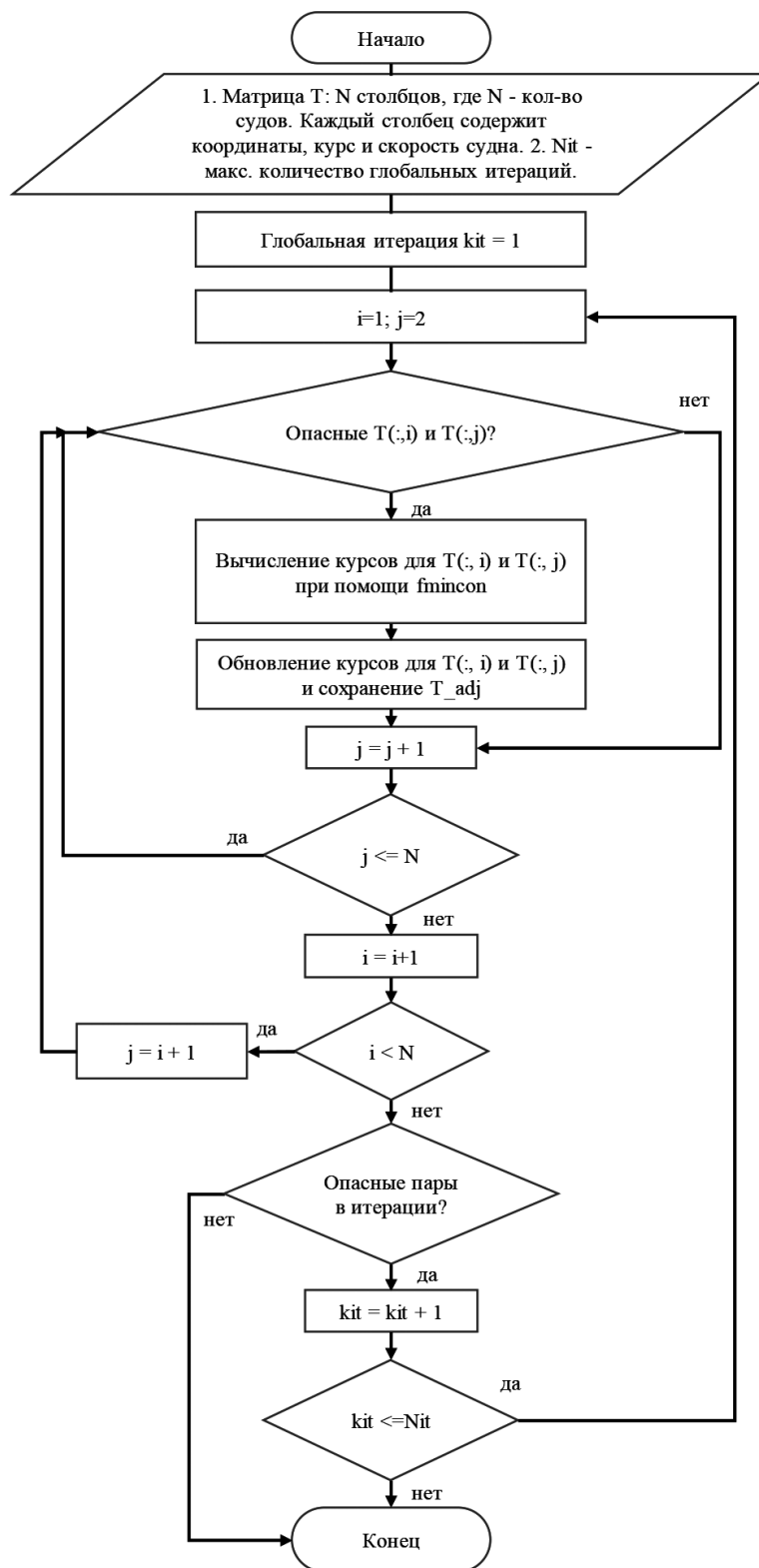


Рис. 1. Упрощенная блок-схема традиционного алгоритма расхождения группы судов

Принцип составления пар в X_i следующий: для судна с индексом i пары будут сформированы со всеми судами, чьи индексы больше i . Таким образом, в X_1 будут находиться данные о парах судов: 1-2, 1-3, ..., 1- n ; в X_2 - 2-3, 2-4, ..., 2- n и так до X_{n-1} . Если в матрице T присутствует четыре судна, то судно № 3 сформирует пару с судном № 4, при этом с судном № 4 пар сформировано

не будет, так как все возможные пары с его участием уже созданы. Данный метод образования пар позволяет рассмотреть каждую пару судов только один раз, исключая повторение и формирование пары одного судна с самим собой.

Основной цикл традиционного алгоритма, максимальное количество итераций N_{it} в котором настраивается пользователем, поочередно обрабатывает матрицы X_i , в каждой из которых производится последовательный попарный расчет дистанции кратчайшего сближения (далее — CPA (Closest Point of Approach)) и времени до CPA (далее — TCPA (Time to Closest Point of Approach)) для всех пар судов. Если в какой-либо паре присутствует опасность столкновения ($CPA < SD$ и $TCPA < D_{TCPA}$), то начинается поиск маневра расхождения, который позволит данной паре судов разойтись на установленной дистанции. Если опасности столкновения для данной пары не существует, то алгоритм переходит к следующей паре. Все вычисленные маневры (изменения курсов) после обработки каждой матрицы X_i применяются к соответствующим судам в матрице T_{adj} , после чего следующая X_i формируется из измененной T_{adj} .

Таким образом обрабатываются все матрицы X_i . После этого создается временная копия матрицы T_{adj} — T_{adj_check} , используемая для финальной проверки безопасности сближения судов. Так же, как и в теле основного цикла, формируются матрицы X_i , и каждая пара судов проверяется на наличие опасности столкновения. При обнаружении опасного сближения в одной из пар в алгоритме запускается тело основного цикла повторно до того, как будет достигнуто максимальное количество итераций. Если среди пар судов не было найдено тех, которые сближаются опасно, алгоритм завершает работу, и пользователь получает матрицу T_{adj} , содержащую решенную ситуацию сближения группы судов в определенной акватории, в которой суда из изначальной матрицы T изменили свои курсы и не имеют опасности столкновения в ближайшие 15 мин.

Описание алгоритма с нейронной сетью для расхождения группы судов. В опубликованном ранее исследовании автора [20] проанализирована эффективность использования нейронной сети для определения маневров расхождения двух судов. В ходе работы было обучено 11 нейронных сетей с различными параметрами, из которых выбрана сеть, позволяющая прогнозировать изменения курсов для расхождения на безопасной дистанции для пар судов с точностью 94,8 %.

Результаты тестирования показали, что при увеличении количества обрабатываемых опасно сближающихся судов до четырех и выше нейронная сеть затрачивает на прогнозирование маневра расхождения для пар судов в пять раз меньше времени, чем традиционный алгоритм. При этом с увеличением числа опасно сближающихся судов в акватории разрыв во времени обработки данных между нейронной сетью и алгоритмом увеличивается, что подтверждают целесообразность применения нейронных сетей при обработке больших массивов данных с парами опасно сближающихся судов. В данной работе предполагается, что нейронная сеть, используемая в алгоритме расхождения группы судов, позволит прогнозировать безопасные курсы для группы сближающихся на одной акватории судов быстрее, чем традиционный алгоритм.

Упрощенная блок-схема алгоритма с нейронной сетью для безопасного маневрирования группы судов приведена на рис. 2. Данные о всех судах в акватории собираются в матрицу T , количество столбцов N в которой равняется количеству судов. Затем так же, как и в описанном ранее алгоритме, из матрицы T формируются матрицы X_i (принцип формирования пар остается неизменным). Основным циклом алгоритма с нейронной сетью в случае обнаружения ситуации опасного сближения в матрицах X_i так же поочередно их обрабатывает и вся матрица X_i попарно передается нейронной сети, обученной обрабатывать массивы с данными о парах судов. Получая на вход матрицу X_i , НС дает на выходе матрицу новых курсов для всех пар из X_i . В соответствии с индексами новые курсы записываются в матрицы X_i и T_{adj} , и затем выполняется проверка CPA / TCPA. Если опасных ситуаций не обнаружено, алгоритм переходит к обработке следующей матрицы X_i , в ином случае нейросеть будет прогнозировать новые курсы до тех пор, пока все пары судов в X_i не станут сближаться безопасно либо не будет исчерпано максимальное количество внутренних итераций M_{it} .

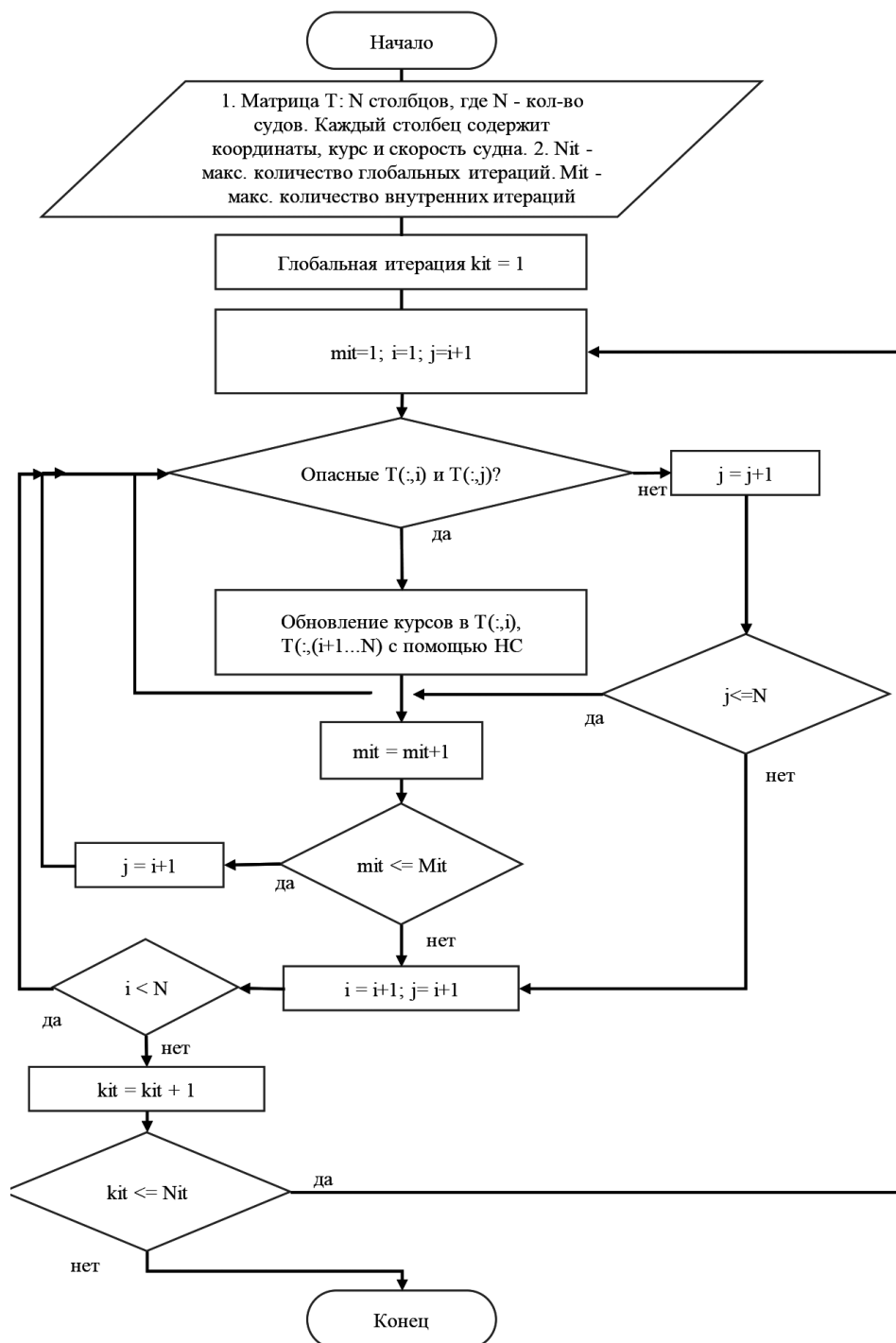


Рис. 2. Упрощенная блок-схема алгоритма с нейронной сетью для расхождения группы судов

После того как все X_i обработаны, выполняется повторная проверка всех СРА / ТСРА из обновленной T_{adj} . В случае обнаружения опасности столкновения будет запущена вторая «глобальная» итерация (максимальное количество глобальных итераций — N_{it}), т. е. снова будут созданы X_i , начиная с X_1 .

Нейронные сети, используемые для тестирования. Для тестирования алгоритма с нейронной сетью было решено использовать две нейронных сети с одинаковыми гиперпараметрами, однако обученными на разном количестве образцов. Первая нейронная сеть (далее — НС-1), была обучена на 563 435 образцах, которые содержали пары судов с СРА < 1 мили и ТСРА ≤ 30 мин. Эта НС в ре-

зультате тестирования показала точность 94,8 % при обработке 100 тыс. образцов тестовой выборки, т. е. рассчитала новые курсы для пар судов таким образом, что они сумели разойтись на дистанции от 0,8 до 1,2 мили. Обучение НС прогнозированию безопасного маневра для расхождения пар судов проводилось в программной среде MATLAB. Набор учебных данных был разделен на обучающую, валидационную и тестовую выборки в соотношении 70 %, 15 % и 15 % соответственно. Обучение НС производилось при помощи алгоритма оптимизации Левенберга – Марквардта. НС-1 имела три скрытых слоя (100, 50 и 25 нейронов в каждом скрытом слое соответственно). Скрытые слои имеют функцию активации Tansig, а выходной слой — Purelin. Формирование набора учебных данных, обучение НС и их тестирование подробнее описаны в [20]. Вторая нейронная сеть (НС-2) имела те же параметры, что и НС-1, однако была обучена на 743 671 образце, которые содержали пары судов с $CRA < 1$ мили и $TCRA \leq 15$ мин. В результате тестирования она показала точность 98,9 %. Предполагается, что НС-2 позволит вычислять новые курсы для групп опасно сближающихся судов с более высокими скоростью и точностью, так как ее прогнозируемые курсы с большей вероятностью будут приводить к безопасному расхождению, и алгоритму, соответственно, потребуется меньше глобальных итераций.

Результаты (Results)

Для тестирования описанных в исследовании алгоритмов расхождения групп судов были созданы три набора данных с различными характеристиками сближения судов.

Первый набор данных: несколько пар судов (от двух до тридцати), опасно сближающихся в одной акватории. Для ускорения процесса создания матриц, содержащих опасно сближающиеся пары судов на одной акватории, был разработан скрипт MATLAB. Сначала была сгенерирована матрица R , содержащая 600 тыс. пар опасно сближающихся судов (изначальная дистанция между которыми больше 3 миль). Алгоритм создания подобных выборок подробнее описан в предыдущих статьях автора. Затем скрипт создавал отдельные ситуации: в матрице T к паре опасно сближающихся судов i , взятой из матрицы R , добавлялась пара судов $i + 1$. Если изначальные дистанциями между всеми судами в матрице T оказывались более 3 миль, то скрипт сохранял данные этой пары в матрице T . В ином случае вместо пары $i + 1$ добавлялась пара $i + 2$ и выполнялся повторный анализ. Так матрицы T наполнялись заданным пользователем количеством пар опасно сближающихся судов. Таким образом было создано по 100 матриц T с ситуациями сближения от 2 до 30 пар судов в одной акватории. Каждый набор матриц T сохранялся в отдельной матрице K для быстрого доступа во время тестирования.

Второй набор данных также генерировался скриптом MATLAB, но создавалась всего одна ситуация опасного сближения, при том, что в акватории находились другие суда. Так были получены по 100 матриц T с как минимум одной опасно сближающейся парой в ситуациях, где в одной акватории находились от 3 до 50 судов.

Третий набор данных создавался вручную при помощи еще одного скрипта MATLAB, при этом пользователю открывается интерактивное «поле» размером 40×40 морских миль. Каждый первый клик по участку поля задает изначальные координаты судна, а каждый второй клик — длину и направление вектора (скорость и курс судна). Данные всех судов, созданных пользователем, записываются в матрицу T . Для каждого вида сближения судов (от двух троек до трех пятерок) были созданы по 30 сценариев (матриц T). По описанию видно, что суда сгруппированы таким образом, чтобы в одной акватории опасно сближались сразу тройки, четверки и пятерки судов. Были созданы различные сценарии, а именно: одновременное сближение на пересекающихся курсах, обгон, ситуации сближения на встречных курсах так, чтобы сразу группы по три, четыре или пять судов имели взаимные ситуации опасного сближения.

Тестирование производилось в программной среде MATLAB на одном компьютере последовательно (процессор Intel(R) Core (TM) i5-9300H 2,40 ГГц). Для фиксации времени, затраченного на вычисления, использовалась функция tic-toc. Вычисления производились следующим образом: оба описанных ранее в работе алгоритма последовательно обрабатывали матрицы K , каждая

из которых содержала совокупность сценариев сближения групп судов T . Время, затраченное алгоритмом на обработку каждой матрицы T , фиксировалось программой и затем усреднялось. В результате обработки из матрицы K была составлена матрица K_{adj} , содержащая матрицы T_{adj} , соответствующие изначально заданным матрицам T . Максимальное количество глобальных итераций для традиционного алгоритма и алгоритма с НС равнялось 50. Все обработанные матрицы T_{adj} были проанализированы на предмет наличия опасно сближающихся пар судов. Если хотя бы одна пара из всей группы судов в T_{adj} имела опасность столкновения, то весь сценарий помечался как *обработанный небезопасно*; если все пары судов имели $CRA > 0,8$ мили при $ТСРА \leq 15$ мин, то такой сценарий помечался как *обработанный безопасно*. Данные тестирования двух алгоритмов приведены в таблице.

Результаты тестирования алгоритмов расхождения группы судов

№ п/п.	Количество судов в ситуации сближения	Количество опасно сближающихся судов	Среднее время обработки одного сценария сближения группы судов алгоритмом			Отношение безопасно обработанных сценариев группы судов алгоритмом к их общему количеству		
			С НС-1, с	С НС-2, с	Традиционным алгоритмом, с	С НС-1, %	С НС-2, %	Традиционный алгоритм, %
Несколько пар опасно сближающихся судов								
1	4	2 пары	0,0415	0,018	0,098	100	100	100
2	6	3 пары	0,0704	0,037	0,1337	99	99	100
3	8	4 пары	0,0684	0,036	0,1806	99	100	100
4	10	5 пар	0,1021	0,049	0,2279	99	100	100
5	12	6 пар	0,0977	0,0625	0,2758	98	100	100
6	14	7 пар	0,1381	0,078	0,3409	99	99	100
7	16	8 пар	0,1514	0,089	0,3818	100	100	100
8	18	9 пар	0,1920	0,1357	0,4649	98	99	100
9	20	10 пар	0,2556	0,1364	0,5254	96	100	100
10	30	15 пар	0,4439	0,3308	0,9802	96	100	100
11	40	20 пар	0,8657	0,6419	2,0131	93	99	100
12	60	30 пар	2,5596	2,1776	4,504	59	91	100
Как минимум одна пара опасно сближающихся судов								
13	3	Как минимум 1 пара	0,0032	0,0092	0,0455	100	100	100
14	5	Как минимум 1 пара	0,0357	0,0161	0,0485	100	100	100
15	10	Как минимум 1 пара	0,0669	0,0295	0,0624	100	100	100
16	15	Как минимум 1 пара	0,0770	0,0576	0,0974	100	100	100
17	20	Как минимум 1 пара	0,1234	0,1012	0,1381	100	100	100
18	25	Как минимум 1 пара	0,2048	0,1508	0,2076	98	100	100
19	30	Как минимум 1 пара	0,3127	0,2115	0,2777	100	100	100

20	40	Как минимум 1 пара	0,6463	0,3423	0,3457	96	100	100
21	50	Как минимум 1 пара	1,0421	0,4927	0,5493	91	100	100
Ситуации, созданные вручную								
22	6	2 тройки	0,1218	0,0626	0,1717	87	97	100
23	9	3 тройки	0,1967	0,0557	0,4028	87	100	100
24	12	4 тройки	0,3015	0,1521	0,5220	84	94	100
25	15	5 троек	0,1749	0,0968	1,1702	93	100	100
26	8	2 четверки	0,2449	0,088	0,5161	83	97	100
27	12	3 четверки	0,2764	0,1459	0,6389	83	97	100
28	16	4 четверки	0,2881	0,1550	1,086	86	97	100
29	10	2 пятерки	0,1845	0,0758	1,057	90	100	100
30	15	3 пятерки	0,2828	0,194	1,060	73	97	100

Как видно из таблицы, традиционный алгоритм обработал все предложенные сценарии сближения таким образом, что в K_{adj} не осталось ни одного сценария, где группы судов имели бы опасные ситуации сближения.

Алгоритм с НС-1 показал следующие результаты: в сценариях с наличием в акватории до 40 судов и с минимум одной ситуацией опасного сближения алгоритм с НС-1 дает удовлетворительные результаты (более 96 % всех сценариев сближения обработаны таким образом, что все суда расходятся безопасно). В сценариях, в которых опасно сближаются пары судов, алгоритм с НС-1 показал себя удовлетворительно при увеличении количества судов до 40 (20 пар) — более 93 % безопасно обработанных сценариев. В сценариях, составленных вручную, на точность алгоритма с НС-1 можно полагаться с осторожностью (73–93 % безопасно обработанных сценариев). Кроме того, алгоритм с НС-1 показал неудовлетворительные результаты при обработке 30 пар опасно сближающихся судов.

Использование НС-2 в алгоритме, как и предполагалось, позволило увеличить точность и скорость вычислений: при обработке сценариев сближения до 50 судов с одной опасно сближающейся парой алгоритм с НС-2 показал результаты, идентичные традиционному алгоритму — 100 % безопасно обработанных сценариев. При обработке ситуаций, где опасно сближаются сразу 30 пар судов, алгоритм с НС-2 спрогнозировал безопасные курсы для всех судов в 91 % сценариев, что является наименее точным результатом. Для 20 и менее пар судов алгоритм с НС-2 показал точность, сравнимую с точностью традиционного алгоритма. В результаты обработки ситуаций, созданных вручную, алгоритм с НС-2 безопасно обработал 97–100 % ситуаций.

Сравнение быстродействия алгоритмов показало различные результаты для разных сценариев. Так, скорость обработки сценариев с большим количеством судов и всего одной опасно сближающейся парой для традиционного и алгоритмов с нейронными сетями оказалась практически одинаковой: некоторые сценарии традиционный алгоритм обрабатывал быстрее, чем алгоритм с НС-1, однако алгоритм с НС-2 затратил меньшее количество времени, чем алгоритм с НС-1 и традиционный. Сценарии с несколькими парами опасно сближающихся судов были обработаны алгоритмом с НС-1 в среднем в 2 раза быстрее, чем с использованием традиционного алгоритма, при этом алгоритм с НС-2 в среднем позволил тратить в 4 раза меньше времени по сравнению с использованием традиционного алгоритма на обработку подобных сценариев.

Ситуации, созданные вручную, были обработаны алгоритмом с НС-1 в 1,4–5,7 раза быстрее, чем с помощью традиционного алгоритма, при этом алгоритм с НС-2 справился с ними в 2,7–14,3 раза быстрее традиционного.

Для иллюстрации работы алгоритмов была создана ситуация, содержащая группу из 14 опасных сближающихся судов в одной акватории: двух, трех, четырех и пяти судов. Исходное состояние векторов движения судов показано на рис. 3, а, где также представлены изначальные курсы K и скорости судов V .

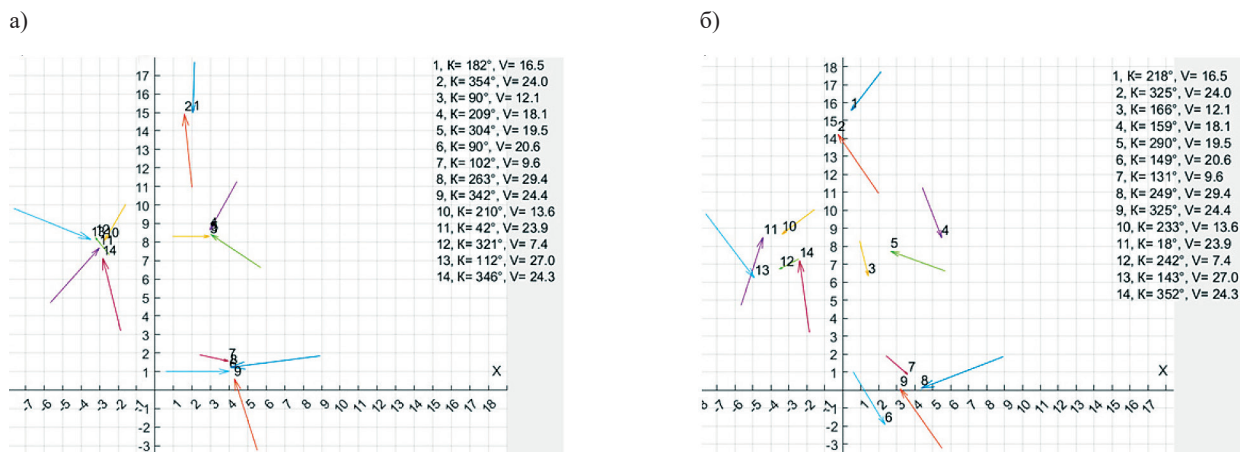


Рис. 3. Состояние векторов движения судов:

а — исходное (во всех группах существует опасность столкновения);

б — после обработки алгоритмом с НС-1

Эту группу судов алгоритм с НС-1 обработал за 0,34 с. Результат работы показан на рис. 3, б, где также видны новые курсы судов, спрогнозированные нейронной сетью. Наиболее опасная комбинация СРА / ТСРА в парах после обработки составила 0,83 мили и 10,6 мин, что является надежным показателем согласно принятым условиям. Эту же группу судов алгоритм с НС-2 обработал за 0,105 с. Наиболее опасная комбинация СРА / ТСРА в парах после обработки составила 0,87 мили и 9,9 мин. Результат работы алгоритма с НС-2 приведен на рис. 4, а.

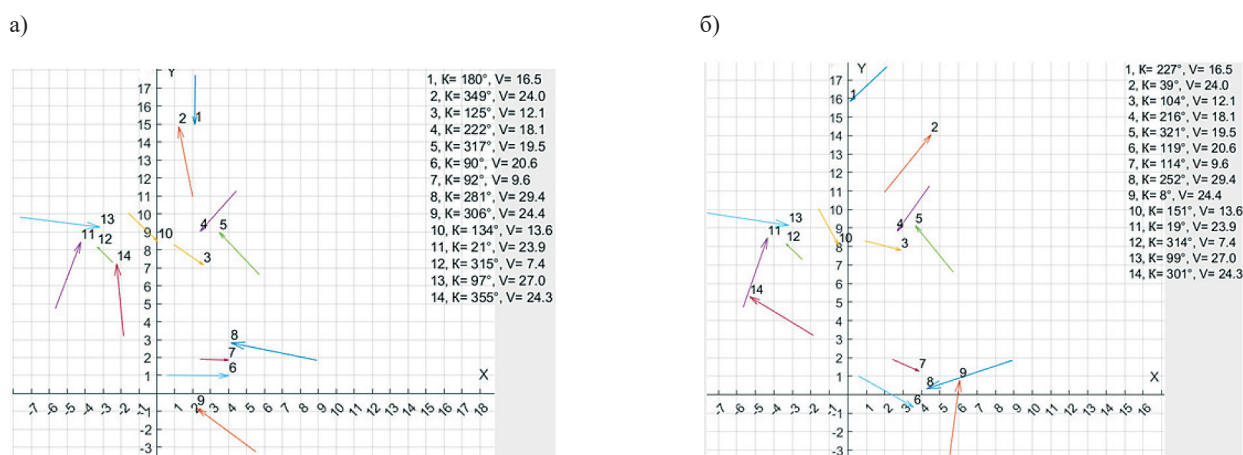


Рис. 4. Состояние векторов движения судов:

а — после обработки алгоритмом с НС-2;

б — после обработки традиционным алгоритмом

Традиционный алгоритм стоимости позволил успешно обработать данную группу судов за 6,5 с. Все суда в T_{adj} расходятся на дистанции как минимум в 1 милю. Результат работы традиционного алгоритма дан на рис. 4, б.

Заключение (Conclusion)

В работе описан подход к решению проблемы безопасного расхождения группы судов в одной акватории на основе попарного анализа всех участвующих в сближении судов и совместного маневрирования.

Выполнены следующие задачи исследования:

1. Описаны «традиционный» и «нейросетевой» алгоритмы вычисления новых курсов для совместного безопасного маневрирования групп автономных судов на основе минимизации функции стоимости и на основе использования нейронной сети.
2. Созданы скрипты в программной среде MATLAB, позволяющие реализовать рассмотренные алгоритмы расхождения групп автономных судов.
3. Проведено тестирование и сравнение быстродействия и эффективности алгоритмов.

В ходе тестирования нейросетевого алгоритма были использованы две нейронных сети, обученные с использованием разного количества образцов. Результаты тестирования показали, что использование в алгоритме НС-2 сети, обученной на 743 671 образце, позволяет находить безопасные курсы для расхождения групп судов с более высокой точностью и скоростью, а также возможность использования в алгоритме НС-1 сети, обученной на 563 435 образцах.

Результаты тестирования свидетельствуют о том, что традиционный алгоритм успешно справляется с тестовыми выборками данных, позволяя всем судам в группе расходиться на заданной пользователем дистанции (1 миля). Алгоритм с НС-1 в данном исследовании показал в основном ненадежные результаты, однако использование алгоритма НС-2 позволило достичь точности, сравнимой с традиционным алгоритмом: 91–100 % при обработке сценариев сближения до 50 судов; в ситуациях, созданных вручную, алгоритм с НС-2 обработал 97–100 % ситуаций безопасно. Нейросетевой алгоритм с НС-2 значительно превзошел традиционный алгоритм по скорости, обрабатывая сценарии в 2–14 раз быстрее в зависимости от количества одновременно опасно сближающихся судов.

Ограничения описанного алгоритма с НС и планируемые улучшения в дальнейших исследованиях заключаются в следующем:

1. После обработки группы судов в акватории алгоритмом с НС для всех участников движения будет спрогнозирован новый курс. Несмотря на то, что изменение курса может быть незначительным, при отсутствии ситуации опасного сближения оно излишне. Эту проблему планируется решить в процессе проведения дальнейших исследований с помощью дополнительного обучения нейронной сети на более крупных объемах данных, включающих также неопасно сближающиеся пары судов.

2. В данной работе не исследуется вопрос оптимальности маневров расхождения и некоторые изменения курсов, прогнозируемые НС, могут быть слишком резкими. На решение этой проблемы будут направлены дальнейшие исследования: планируется усовершенствовать алгоритм, а также дообучить нейронную сеть.

3. Данный алгоритм не позволяет судам маневрировать скоростью. Несмотря на то, что маневр курсом, согласно Международным правилам предотвращения столкновений судов в море (МППСС-72), является наиболее эффективным, замедление (или ускорение) может помочь избежать излишних резких поворотов. В процессе проведения дальнейших исследований планируется внедрить возможность прогнозирования нейронной сетью изменений скоростей, однако это потребует значительных вычислительных мощностей и больших объемов обучающих данных.

4. В настоящее время алгоритм с нейронной сетью не позволяет обрабатывать более шестидесяти опасно сближающихся судов на одной акватории с точностью в 100 %. Отношение безопасно обработанных сценариев, созданных пользователем, к их общему количеству алгоритмом с НС-2 сопоставимо с результатами традиционного алгоритма, однако не всегда составляет 100 %. Несмотря на низкую вероятность одновременного опасного сближения такого количества судов в одной акватории алгоритм с нейронной сетью в будущих исследованиях должен быть доработан с точки зрения улучшения методики выбора маневров для каждого судна для учета прогнозируемых

изменений параметров движения всех судов. Также с целью повышения точности и надежности нейронная сеть, используемая в алгоритме, должна быть дообучена на более масштабных обучающих выборках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gu Y.* Autonomous vessels: state of the art and potential opportunities in logistics / Y. Gu, J. C. Goez, M. Guajardo, S. W. Wallace // *International Transactions in Operational Research*. — 2021. — Vol. 28. — Is. 4. — Pp. 1706–1739. DOI: 10.1111/itor.12785.
2. Symposium on “Making headway on the IMO MASS Code”. IMO [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/Symposium-on-%CA%BA-making-headway-on-the-IMO-MASS-Code%E2%80%9D.aspx> (Дата обращения 25.06.2024).
3. Autonomous shipping. IMO [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx> (Дата обращения 25.06.2024).
4. *Zhang X.* Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey / X. Zhang, C. Wang, L. Jiang, L. An, R. Yang // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 235. — Pp. 109380. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109380.
5. *Kim D.* Development of ship collision avoidance system and sea trial test for autonomous ship / D. Kim, J. S. Kim, J. H. Kim, N. K. Im // *Ocean Engineering*. — 2022. — Vol. 266. — Pp. 113120. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113120.
6. *Chun D. H.* Deep reinforcement learning-based collision avoidance for an autonomous ship / D. H. Chun, M. I. Roh, H. W. Lee, J. Ha, D. Yu // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 234. — Pp. 109216. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109216.
7. *Hu Y.* A real-time collision avoidance system for autonomous surface vessel using fuzzy logic / Y. Hu, X. Meng, Q. Zhang, G. K. Park // *IEEE Access*. — 2020. — Vol. 8. — Pp. 108835–108846. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001626.
8. *Смоленцев С. В.* Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, Ю. М. Искандеров // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.
9. *Смоленцев С. В.* Значение контекста в задаче кооперативного маневрирования безэкипажных судов / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов, А. Е. Пелевин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 221–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-221-229.
10. *Wang S.* A collaborative collision avoidance strategy for autonomous ships under mixed scenarios / S. Wang, Y. Zhang, F. Song, W. Mao // *The Journal of Navigation*. — 2023. — Vol. 76. — Is. 2–3. — Pp. 200–224. DOI: 10.1017/S0373463323000012.
11. *Артемов А. В.* Численное исследование задачи безопасного расхождения групп морских автономных надводных судов / А. В. Артемов, В. А. Петров, В. М. Гриняк // *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. — 2023. — Т. 15. — № 3 (67). — С. 104–119. DOI: 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119.
12. *Артемов А. В.* Имитационное моделирование безопасного расхождения групп морских судов / А. В. Артемов, В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. А. Петров // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. — 2023. — Т. 11. — № 3 (42). — С. 25–26. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011.
13. *Li M.* A novel cost function for decision-making strategies in automotive collision avoidance systems / M. Li, F. Straub, M. Kunert, R. Henze, F. Küçükay // *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. — IEEE, 2018. — Pp. 1–8. DOI: 10.1109/ICVES.2018.8519591.
14. *Liu C.* Optimisation based control framework for autonomous vehicles: Algorithm and experiment / C. Liu, W. H. Chen, J. Andrews // *2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. — IEEE, 2010. — Pp. 1030–1035. DOI: 10.1109/ICMA.2010.5588100.
15. *Бурмака И. А.* Управление парой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, Г. Е. Калининченко, М. А. Кулаков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 3 (37). — С. 64–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-64-70.

16. Головинов А. О. Преимущества нейронных сетей перед традиционными алгоритмами / А. О. Головинов, Е. Н. Климова // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. статей по материалам V междунар. науч.-практ. конф. — Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2017. — С. 11–15.

17. Кононова Н. В. Преимущества нейронных сетей / Н. В. Кононова, Т. И. Авдеева, П. Е. Обласов, И. В. Григорьева // Актуальные проблемы информатизации образования: опыт, проблемы, перспективы развития: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. — Черкесск: Библиотечно-издательский центр Северо-Кавказской государственной академии, 2020. — С. 91–93.

18. Ahn J. H. A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic / J. H. Ahn, K. P. Rhee, Y. J. You // *Applied Ocean Research*. — 2012. — Vol. 37. — Pp. 162–173. DOI: 10.1016/j.apor.2012.05.008.

19. Триполец О. Ю. Расчет маневра расхождения двух безэкипажных судов путем минимизации функции стоимости в компьютерной среде MATLAB / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 876–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884.

20. Триполец О. Ю. Анализ эффективности применения нейронной сети в прогнозировании маневров расхождения двух судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 251–258. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-251-258.

REFERENCES

1. Gu, Yewen, Julio Cesar Goetz, Mario Guajardo, and Stein W. Wallace. “Autonomous vessels: state of the art and potential opportunities in logistics.” *International Transactions in Operational Research* 28.4 (2021): 1706–1739. DOI: 10.1111/itor.12785.

2. Symposium on “Making headway on the IMO MASS Code”. IMO. Web. 25 June 2024 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/Symposium-on-%CA%BA-Making-headway-on-the-IMO-MASS-Code%E2%80%9D.aspx>>.

3. Autonomous shipping. IMO. Web. 25 June 2024 <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>>.

4. Zhang, Xinyu, Chengbo Wang, Lingling Jiang, Lanxuan An, and Rui Yang. “Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey.” *Ocean Engineering* 235 (2021): 109380. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109380.

5. Kim, Donggyun, Jin-Soo Kim, Jung-Hyun Kim, and Nam-Kyun Im. “Development of ship collision avoidance system and sea trial test for autonomous ship.” *Ocean Engineering* 266 (2022): 113120. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113120.

6. Chun, Do-Hyun, Myung-Il Roh, Hye-Won Lee, Jisang Ha, and Donghun Yu. “Deep reinforcement learning-based collision avoidance for an autonomous ship.” *Ocean Engineering* 234 (2021): 109216. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109216.

7. Hu, Yancai, Xiangfei Meng, Qiang Zhang, and Gyei-Kark Park. “A real-time collision avoidance system for autonomous surface vessel using fuzzy logic.” *IEEE Access* 8 (2020): 108835–108846. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3001626.

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

9. Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Alexander E. Pelevin. “The context importance in the problem of cooperative maneuvering of unmanned ships.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 221–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-221-229.

10. Wang, Shaobo, Yingjun Zhang, Feifei Song, and Wengang Mao. “A collaborative collision avoidance strategy for autonomous ships under mixed scenarios.” *The Journal of Navigation* 76.2-3 (2023): 200–224. DOI: 10.1017/S0373463323000012.

11. Artemyev, A. V., V. A. Petrov, and V. M. Grinyak. “Numerical modelling of collision avoidance for marine autonomous vessels.” *The territory of new opportunities. The herald of Vladivostok State University* 15.3(67) (2023): 104–119. DOI: 10.24866/VVSU/2949-1258/2023-3/104-119.

12. Artemiev, A. V., V. M. Grinyak, A. S. Devyatisilnyi, and V. A. Petrov. "Collision avoidance modeling for a group of marine autonomous vessels." *Modeling, optimization and information technology* 11.3 (42) (2023): 25–26. DOI: 10.26102/2310-6018/2023.42.3.011.

13. Li, Mingkang, Fabian Straub, Martin Kunert, Roman Henze, and Ferit Küçükay. "A novel cost function for decision-making strategies in automotive collision avoidance systems." *2018 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*. IEEE, 2018. DOI: 10.1109/ICVES.2018.8519591.

14. Liu, Cunja, Wen-Hua Chen, and John Andrews. "Optimisation based control framework for autonomous vehicles: Algorithm and experiment." *2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. IEEE, 2010. DOI: 10.1109/ICMA.2010.5588100.

15. Burmaka, I.A., G. E. Kalinichenko, and M. A. Kulakov. "Management by pair of vessels in situation of dangerous rapprochement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 64–70. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-64-70.

16. Golovinov, A., and E. Klimova. "Advantages of neural networks before traditional algorithms." *Ekspertimetal'nye i teoreticheskie issledovaniya v sovremennoi nauke*. Novosibirsk: Assotsiatsiya nauchnykh sotrudnikov «Sibirskaya akademicheskaya kniga», 2017. 11–15.

17. Kononova, N. V., T. I. Avdeeva, P. E. Oblasov, and I. V. Grigorieva. "Advantages of neural networks." *Aktual'nye problemy informatizatsii obrazovaniya: opyt, problemy, perspektivy razvitiya*. Cherkessk: Bibliotechno-izdatel'skii tsentr Severo-Kavkazskoi gosudarstvennoi akademii, 2020. 91–93.

18. Ahn, Jin-Hyeong, Key-Pyo Rhee, and Young-Jun You. "A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic." *Applied Ocean Research* 37 (2012): 162–173. DOI: 10.1016/j.apor.2012.05.008.

19. Tripolets, Oleg Y. "Calculating a collision avoidance maneuver for two unmanned ships by minimizing a cost function in MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 876–884. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-876-884.

20. Tripolets, Oleg Y. "Analysis of the neural network application effectiveness in predicting collision avoidance maneuvers for two vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 251–258. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-251-258.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Триполец Олег Юрьевич — 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: tripolets.97@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tripolets, Oleg Y. — 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: tripolets.97@mail.ru

Статья поступила в редакцию 7 августа 2024 г.

Received: August 7, 2024.