

CALCULATING A COLLISION AVOIDANCE MANEUVER FOR TWO UNMANNED SHIPS BY MINIMIZING A COST FUNCTION IN MATLAB

O. Y. Tripolets

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

An approach to the problem of collision avoidance of two unmanned vessels in certain area based on cost function minimization is presented in the paper. A script written in the MATLAB computational environment that calculates the optimal maneuver to prevent a collision is described. The cost function in this study is defined as the square of the difference between the safe distance and the Closest Point of Approach, and in order to find the optimal maneuver, it needs to be minimized, for which the fmincon (a MATLAB optimization function) is used in this code. The calculation of collision avoidance maneuvers is made "from the perspective" of the VTS: it's optimized for two vessels and allows the vessels to pass each other at a specified distance. The script, taking as input a matrix with data on pairs of approaching vessels (their x and y coordinates, speeds, and courses), by minimizing the cost function, calculates the optimal change in speeds and/or coordinates for two vessels, allowing them to pass each other at a safe distance. To verify the functionality of the script, a successful simulation is carried out in MATLAB. Several examples of its operation are given. These are situations where the closest point of approach (CPA) is greater than safe one; situations where the CPA is less than safe distance, but the time to CPA is greater than safe time; and situations of dangerous convergence. The calculation results are illustrated with MATLAB graphs. The code of the script described in this paper can be further refined to work in conjunction with other algorithms, and it can also be used to create training datasets for training neural networks to predict safe maneuvers to prevent collisions of unmanned vessels at sea. In this study, the influence of wind and current is not considered, and the COLREGs-72 is not also taken in consideration. Vessels can maneuver both to port and starboard, as well as reduce speed regardless of the type of approach situation.

Keywords: CPA, cost function minimization, vessels motion modelling, collision avoidance, unmanned surface vessel, MATLAB, neural networks.

For citation:

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.

УДК 656.61.052

РАСЧЕТ МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ ДВУХ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ ПУТЕМ МИНИМИЗАЦИИ ФУНКЦИИ СТОИМОСТИ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СРЕДЕ MATLAB

О. Ю. Триполец

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

В данной работе представлен подход к решению проблемы расхождения двух безэкипажных судов в определенной акватории на основе минимизации функции стоимости, а также описан скрипт, написанный в компьютерной среде MATLAB, позволяющий вычислить оптимальный маневр для предотвращения столкновения. Функция стоимости в данной работе определена как квадрат разности между безопасной дистанцией и дистанцией опасного сближения, и в целях нахождения оптимального маневра должна быть минимизирована, для чего в данном коде используется fmincon (функция оптимизации MATLAB). Расчет маневров расхождения производится с учетом СУДС сразу для двух судов, является оптимальным и позволяет судам разойтись на заданной безопасной дистанции. Скрипт, получая на вход

матрицу, содержащую данные о парах сближающихся судов (их координатами по осям X и Y , скоростями и курсами), путем минимизации функции стоимости (*Cost Function*), вычисляет оптимальное изменение скоростей и / или курсов для двух судов, позволяющее им разойтись на безопасной дистанции. Для проверки работоспособности скрипта была проведена успешная симуляция в компьютерной среде MATLAB. Приведены несколько примеров его работы: ситуации, где дистанция кратчайшего сближения была больше безопасной; ситуации, где дистанция кратчайшего сближения была меньше безопасной, но время до столкновения — больше безопасного; и ситуации опасного сближения. Результаты расчетов показаны на графиках в MATLAB. Код описываемого в данной работе скрипта может быть усовершенствован для совместной работы с другими алгоритмами, а также может быть использован для создания обучающих выборок для обучения нейронных сетей прогнозированию безопасных маневров для предотвращения столкновений безэкипажных судов в море. В данной работе не учитывается влияние ветра и течения, а также отсутствует учет МППСС-72, и суда могут маневрировать как влево, так и вправо, а также снижать скорость вне зависимости от вида ситуации сближения.

Ключевые слова: дистанция кратчайшего сближения, минимизация функции стоимости, моделирование движения судов, предотвращение столкновений, безэкипажное судно, MATLAB, нейронные сети.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

В настоящее время исследования, посвященные эксплуатации безэкипажных судов (БЭС), во многом мотивированы стремлением к оптимизации перевозок грузов морем и повышением их стабильности безопасности. Выполненный в работе [1] анализ морских аварий показал, что большинство из них происходят по вине человека. Введение высоких уровней автономности позволит уменьшить количество аварий на морском транспорте, снизить затраты на топливо, операционные расходы (включая экипаж), а также снизить риски морских перевозок за счет уменьшения частоты и последствий человеческих ошибок. Однако для полноценного перехода к эксплуатации БЭС ученым еще предстоит решить ряд проблем, одной из которых является проблема безопасного расхождения БЭС в море.

В настоящее время существует множество подходов к решению этой проблемы, новейшие из которых рассмотрены в [2], [3]. Авторы [4] используют методы оптимизации и минимизации функции стоимости для обхода судном статических и динамических препятствий и нахождения безопасного маршрута следования. Автор статьи [5], где нейронные сети (НС) применяются не только для расхождения с другими судами, но и для идентификации всех препятствий, встречающихся на пути судна, предлагает основанное на теории нейронных сетей с применением глубокого обучения решение задачи интегрирования всех датчиков, обеспечивающих возможность самостоятельной навигации судна. Данный подход был успешно испытан на 10-метровом исследовательском судне на дистанции 11 миль в заливе Чесапик (США). Авторы [6] для решения задачи безэкипажного расхождения судов взяли за основу нейросетевую архитектуру GoogleNet.

Использование методов глубокого обучения и долгой краткосрочной памяти в комбинации с эвристическим планированием позволило создать НС, которая успешно справляется с задачей расхождения с тремя и четырьмя судами в компьютерной симуляции (без учета МППСС-72). Эволюционные НС, построенные с помощью кодирования на ассемблере с эволюционирующими операциями (Assembler Encoding with Evolvable Operations) и кооперативные коэволюционные НС (Cooperative Co-Evolutionary Neural Networks), использованные в работе [7], успешно справились с выполнением 170 тренировочных сценариев расхождения судов в программной среде, 40 из которых спроектировал судоводитель, 70 — дилетант и 60 — программа. При этом судно-оператор могло предпринимать любые маневры для предотвращения столкновений. В статье [8] авторам удалось провести успешную симуляцию подхода к решению проблемы расхождения БЭС в программной среде MATLAB, используя для этого нейронные сети и глубокое обучение с подкреплением.

Свой алгоритм они назвали DRLOAD (Deep Reinforcement Learning Obstacle Avoidance Decision-Making — глубокое обучение с подкреплением для принятия решений при расхождении с препятствиями).

Приведенные ранее подходы описывают ситуации расхождения одного судна (или «нашего судна» — own ship) со статическими препятствиями и / или другими судами. Рассмотренный в данной статье подход предполагает, что мониторинг и регулирование движения в определенной акватории происходят «извне», и расчет маневра производится не для одного, а для обоих судов, участвующих в расхождении. В данной работе описан подход к решению проблемы расхождения безэкипажных судов, основанный на геометрической интерпретации движения двух судов в определенной акватории, что делает его прямолинейным и предоставляет большой потенциал для дальнейшего усовершенствования. Результаты работы скрипта, описанного в рамках данного подхода, планируется использовать для создания обучающих выборок для нейронных сетей, которые впоследствии смогут прогнозировать оптимальные маневры для ситуаций опасного сближения двух судов в определенной акватории.

Цель работы — описать подход к решению проблемы расхождения двух безэкипажных судов в определенной акватории.

Задача работы — создать скрипт, позволяющий рассчитывать маневры расхождения на безопасной дистанции для двух судов в определенной акватории, и доказать его работоспособность.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опасность столкновения судов тем выше, чем выше их концентрация в определенной акватории. Для управления движением судов может быть использована система управления движением судов (далее — СУДС), координирующая движение судов в определенной зоне. Системы СУДС получают данные о позициях, курсах и скоростях судов в акватории, вычисляют дистанцию кратчайшего сближения (Closest Point of Approach, далее — CPA) между судами и корректируют траектории их движения. Подход, рассмотренный в данной статье, направлен на решение задачи безопасного расхождения судов «со стороны» СУДС, т. е. пункта управления, который имеет параметры движения судов в определенной акватории. При обнаружении ситуации опасного сближения СУДС направит команду на изменение скоростей и / или курсов для обоих судов с целью предотвращения столкновения. Созданный в данной работе скрипт позволяет решить задачу нахождения оптимального маневра курсом и скоростью для расхождения двух судов в определенной акватории на безопасной дистанции.

Описание работы скрипта. Предполагается, что в рабочее поле (Workspace) программы MATLAB загружена матрица X , содержащая данные о n -количестве пар судов:

$$X := \begin{pmatrix} \begin{matrix} \text{1-й образец} & \text{2-й образец} & \dots & \text{n-й образец} \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_1 & x_1 & \dots & x_1 \\ y_1 & y_1 & \dots & y_1 \\ v_1 & v_1 & \dots & v_1 \\ K_1 & K_1 & \dots & K_1 \\ x_2 & x_2 & \dots & x_2 \\ y_2 & y_2 & \dots & y_2 \\ v_2 & v_2 & \dots & v_2 \\ K_2 & K_2 & \dots & K_2 \end{matrix} \end{pmatrix}$$

В каждом столбце массива X находятся так называемые *образцы* — пары судов, где x_1, x_2, y_1, y_2 — координаты первого и второго судов пары по осям X и Y соответственно; v_1 и v_2 — начальные скорости судов в узлах; K_1 и K_2 — их начальные курсы.

Имея данные двух судов, необходимо определить наличие опасности столкновения между ними. Для каждой пары судов расчет дистанции кратчайшего сближения (СРА) выполняется сле-

дующим образом: дистанция между двумя судами в момент времени t вычисляется по следующей формуле:

$$D(t) = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = \sqrt{[x_2 - x_1 + (v_2 \cos K_2 - v_1 \cos K_1)t]^2 + [y_2 - y_1 + (v_2 \sin K_2 - v_1 \sin K_1)t]^2}. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что для правильного выполнения расчетов и отображения курсов судов в рабочей среде MATLAB курсы судов необходимо вводить через « $\pi/2$ — курс». Это преобразование координат связано с разницей в ориентации осей и определении углов в математической и навигационных системах (используя выражение « $\pi/2$ — курс», переводим «навигационный» угол в «математический»). Приравняв производную по времени от дистанции между судами нулю, получим уравнение, из которого можно найти такое значение времени, при котором данное равенство будет иметь место и которое в данном случае будет являться временем ТСПА (Time to Closest Point of Approach) сближения судов на кратчайшую дистанцию. Определив таким способом значение ТСПА и подставив его в исходное выражение (1), найдем значение CPA [9]. Для нахождения минимума в MATLAB использовалась функция `fminbnd`, для поиска CPA использовался трехчасовой промежуток.

Зная CPA и ТСПА для всех пар судов из матрицы X , можно приступить к вычислению маневров, необходимых для предотвращения столкновений. В описываемом скрипте были установлены следующие условия:

- если CPA больше безопасной дистанции (задается пользователем), расчет маневра расхождения не производится;
- если CPA меньше безопасной дистанции, но ТСПА больше опасного ТСПА (задается пользователем), то расчет маневра расхождения не производится, а данная пара судов помечается особым образом для привлечения внимания пользователя;
- если CPA меньше безопасной дистанции и ТСПА меньше опасного ТСПА, то выполняется расчет маневра расхождения судов.

Расчет маневра для безопасного расхождения двух судов. Созданный в рамках данного подхода скрипт позволяет на основе матрицы X , содержащей данные о парах судов, формировать матрицу $X_adjusted$, содержащую данные о парах судов, среди которых нет опасно сближающихся.

В начале скрипта данные о парах судов из матрицы X копируются в матрицу $X_adjusted$. Кроме того, задаются такие параметры, как SD (Safety Distance — безопасная дистанция, равная в данной работе одной морской миле), D_TCPA (D — Dangerous — опасное ТСПА; в данной работе составляет полчаса).

Далее код скрипта начинает выполнение цикла: для каждой пары судов производится расчет CPA и ТСПА согласно формуле (1). Если $CPA > SD$, т. е. опасности столкновения между судами в паре не существует, данные соответствующих судов не меняются в $X_adjusted$. Если $CPA < SD$, но $TCPA > D_TCPA$, т. е. опасность столкновения существует, но позже, чем через 30 мин, расчет маневра также не производится и данные о соответствующей паре останутся в $X_adjusted$ без изменения, однако пользователь увидит сообщение о том, что опасность столкновения существует, при этом значение ТСПА также будет выведено на экран. Если $CPA < SD$ и $TCPA \leq D_TCPA$, т. е. в данной паре судов существует непосредственная опасность столкновения, то начинается расчет маневра для расхождения этих судов на безопасной дистанции.

Поиск оптимального изменения скорости и / или курса ведется при помощи Cost Function (функции стоимости, или целевой функции). Эта функция в данной работе определена как квадрат разности между SD и вычисленной CPA и в целях нахождения оптимального маневра должна быть минимизирована, для чего в данном коде используется функция `fmincon` (функция оптимизации в MATLAB). Функция `fmincon` пытается найти такой вектор *actions* (вектор маневров, состоящий из изменений курсов и скоростей обоих судов), при котором Cost Function минимальна. Каждый раз, когда `fmincon` предлагает новый вектор *actions*, Cost Function вычисляется снова, используя эти маневры. Если значение функции стоимости меньше для нового вектора *actions*, то этот вектор

считается более оптимальным и сохраняется. Этот процесс продолжается, пока `fmincon` не найдет вектор `actions`, который не может быть улучшен дальнейшими изменениями или до тех пор, пока не будет достигнута максимальная количество итераций. Описанные ранее действия выполняются в коде следующим образом:

```
CostFunction = @(actions) (SD - CPA(x1, y1, speed1, course1, x2, y2, speed2, course2, actions)).^2;
```

```
OptimalActions = fmincon(CostFunction, InitialActions, [], [], [], [], lb, ub, [], options);
```

`InitialActions` (изначальный маневр) является нулевым вектором; `lb` (lower bound) и `ub` (upper bound) используются для установки ограничений маневрирования для судов. В данной работе было определено следующее: суда не могут изменять свой курс более, чем на 60 градусов, возможно только снижение скорости (ускорение запрещено), минимальная скорость не может быть ниже 0 уз. В данной работе оба судна могут маневрировать путем изменения курса и скорости. Учет МППСС в данном скрипте не предусмотрен. Возможно маневрирование курсом как вправо, так и влево.

Вычисленные оптимальные действия (`OptimalActions`) позволяют изменить изначальную CPA до значений, равных или превосходящих SD, и затем в коде используются для обновления изначальных скоростей и / или курсов пар судов. Эти данные переносятся в `X_adjusted`, таким образом формируя матрицу с парами судов, расходящихся на безопасных дистанциях. Информация о факте выполнения расчетов для пары судов выводится на экран: пользователю видна изначальная CPA, необходимая для безопасного расхождения изменения скоростей и / или курсов для судов *A* и *B*, а также CPA, рассчитанная после «выполнения» судами маневра.

Результаты (Results)

Симуляция работы скрипта в MATLAB. Проверим работоспособность ранее описанного скрипта. Создадим матрицу *X*, содержащую данные о пятистах парах случайных судов. Предположим, что данный скрипт используется в реальных условиях в СУДС. Данные о судах СУДС получает заблаговременно, чтобы иметь возможность координировать их безопасное маневрирование. Так как матрица *X* создается путем генерации случайных значений в определенных пределах, необходимо убедиться, что суда во всех парах находятся на достаточном изначальном расстоянии друг от друга. Согласно некоторым толкованиям положений МППСС-72, «Сближение двух судов в открытом море на расстоянии около 2 миль обычно считается чрезмерным» [10, с. 169–170]. Убедимся, что в матрице *X* все суда изначально находятся как минимум в трех милях друг от друга, чтобы у них была возможность выполнить маневр, а также чтобы исключить ситуацию, в которой суда изначально при случайной генерации событий находятся «друг на друге». Для этого в компьютерной среде MATLAB был написан скрипт, рассчитывающий изначальные дистанции между судами в парах из матрицы *X*. Координаты пар, в которых суда находятся на расстоянии менее 3 миль друг от друга, изменяются в данном скрипте случайным образом до тех пор, пока дистанция между ними не достигнет трех миль или более. Теперь матрица *X*, «обработанная» таким скриптом, не содержит судов, находящихся на недостаточном расстоянии друг от друга так же, как и в действительности СУДС обнаруживает сближение судов заблаговременно, используя данные с АИС и радаров.

Для построения графиков и моделирования движения пар судов до и после маневра использовалась программа из работы [11], позволяющая осуществлять визуальную презентацию движения двух судов и наблюдать наличие или отсутствие опасности столкновения, т. е. производить симуляцию работы алгоритма расхождения и проверку его эффективности. Некоторые из 500 пар судов в созданной матрице *X* имеют опасность столкновения и изначально расположены на расстоянии трех миль и более друг от друга.

Используем описанный в данной работе скрипт для создания `X_adjusted`. Рассмотрим конкретные пары судов для демонстрации работы скрипта.

Пара судов № 1 (рис. 1). (Здесь и далее на рисунках представлены скриншоты графиков, построенных в программе MATLAB): [–12; 1; 16; 5,7; –2; 2; 10; 4,6] (здесь и далее в квадратных скобках приведены столбцы матрицы *X*, соответствующие определенным парам судов). CPA = 9,87 мили,

ТСРА = 8,2 мин. Изначальная дистанция 10 миль. Пользователю не выводятся данные о данной паре, так как опасность столкновения отсутствует ($CPA > SD$).

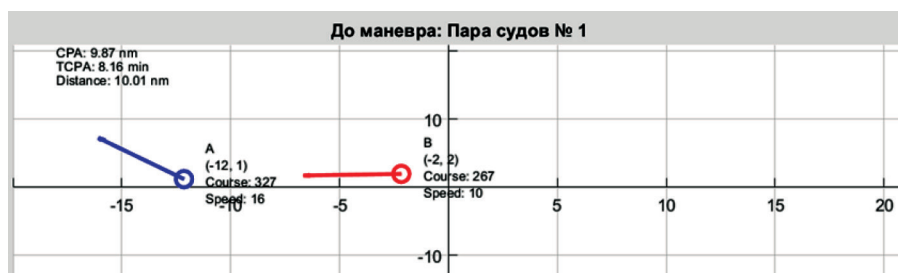


Рис. 1. Пара № 1: опасность столкновения отсутствует

Пара судов № 4 (рис. 2): $[-9; -15; 8; 5,7; -13; -6; 11; 2,6]$. CPA = 0,69 мили, ТСРА = 31 мин. Изначальная дистанция 9,53 мили. Опасность столкновения существует ($CPA < SD$), однако до ситуации опасного сближения более чем полчаса. Маневр не рассчитывается. Пользователю выводятся данные о номере этой пары, ее CPA и ТСРА.

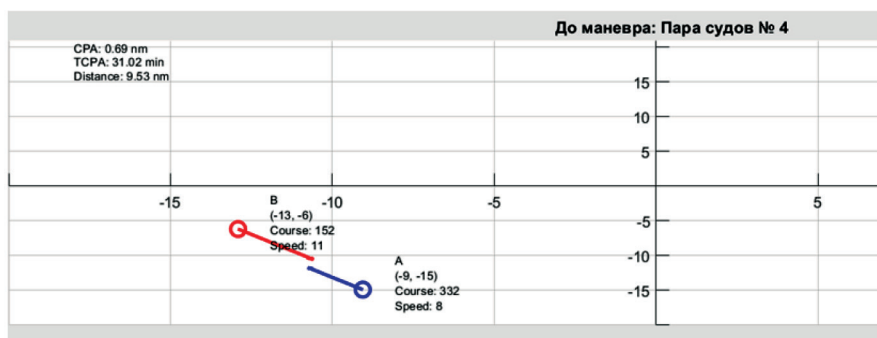


Рис. 2. Пара № 2: опасность столкновения существует позднее заданного ТСРА

Пара судов № 201 (рис. 3): $[16; 1; 3; 2,7; 14; 5; 16; 2,7]$. CPA = 0,09 мили, ТСРА = 20,6 мин. Изначальная дистанция 4,36 мили. $CPA < SD$ и $ТСРА < D_ТСРА$. Для данной пары рассчитывается маневр оптимального расхождения. Пользователю выводится следующая информация:

Пара судов № 201: Изначальная CPA = 0,09 мили;
Судно A: изм. курса = $-0,33$ rad; изм. скорости 0,16 уз.
Судно B: изм. курса = 0,11 rad; изм. скорости 0,00 уз.
CPA после маневра = 1.00 мили.

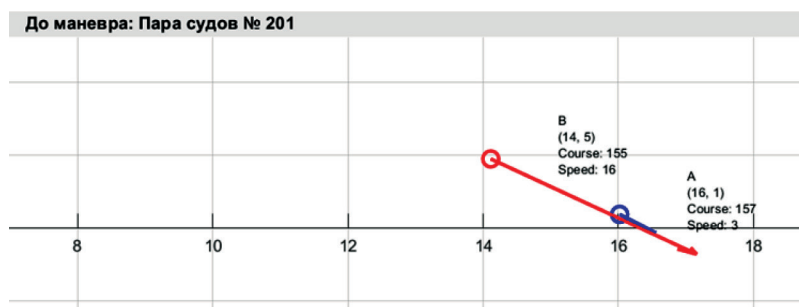


Рис. 3. Пара № 201 до маневра: опасность столкновения существует

После маневрирования, в соответствии с данным скриптом, получаем измененные значения скоростей и курсов для пары № 201 в матрице $X_adjusted$: $[16; 1; 2.837; 2.408; 14; 5; 16; 2.819]$ (рис. 4).

Курс судна *A* изменился от 157° до 138° , курс судна *B* — от 155° до 162° (суда сманеврировали в разные стороны). Скорость судна *A* была также изменена (незначительно) с 3 до 2,8 уз. CPA теперь равна одной миле, ТСРА — 19,5 мин. Как видно из данного примера, ситуации опасного сближения для данной пары более не существует и CPA = SD.

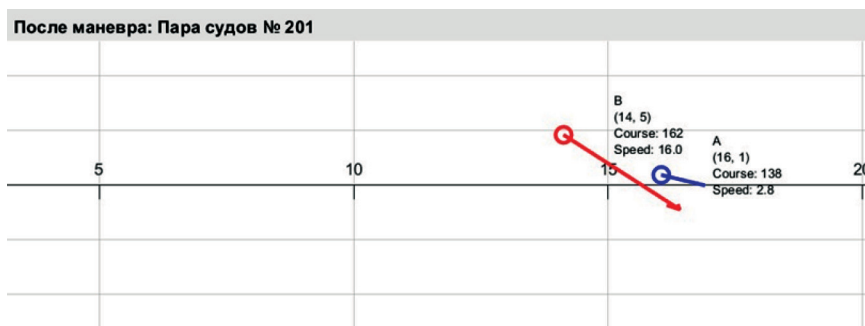


Рис. 4. Пара № 201 после маневра: опасность столкновения отсутствует

Так как данный скрипт создает матрицу с измененными скоростями и / или курсами для опасно сближающихся судов (что приводит к их расхождению на безопасной дистанции), результаты его работы могут быть использованы для обучения нейронных сетей, которые затем могут быть использованы для быстрого прогнозирования необходимых изменений в скорости и курсе для предотвращения столкновений судов.

Заключение (Conclusion)

В работе описан подход к решению проблемы расхождения безэкипажных судов, основанный на геометрической интерпретации движения двух судов и минимизации функции стоимости. Его особенностью является то, что расчет маневра производится сразу для двух судов, находящихся в определенной акватории (например, зоне ответственности СУДС). В рамках данного подхода написан скрипт, позволяющий обнаружить пары опасно сближающихся судов и при необходимости рассчитать оптимальный маневр предотвращения столкновения для обоих судов. Результатом работы скрипта является преобразование матрицы, содержащей данные об опасно сближающихся судах, в матрицу, состоящую из пар судов с теми же координатами, но измененными скоростями и / или курсами так, что опасности столкновения для них больше не существует. Работоспособность скрипта была проверена и подтверждена в симуляции в программной среде MATLAB.

В работе не учитывается влияние ветра и течения, а также отсутствует учет МППСС-72 и времени, необходимого на изменение курса / скорости. Оба судна могут маневрировать как влево, так и вправо и при необходимости сбавлять скорость, что будет оптимальным решением задачи предотвращения столкновения в конкретном случае. В дальнейшем планируется усовершенствовать скрипт таким образом, чтобы оптимальный маневр рассчитывался для трех и более судов, находящихся в зоне действия СУДС. Поскольку вычисления CPA могут осуществляться медленнее, чем использование нейронных сетей [12], планируется, что в дальнейшем скрипт будет использовать НС, обученную нахождению дистанции кратчайшего сближения между двумя судами.

Предлагаемый в работе скрипт написан с использованием циклов, т. е. он обрабатывает каждую пару судов по очереди, что может быть проблематично при большом количестве судов, поскольку время выполнения кода может значительно увеличиться. В связи с этим планируется внедрить в данный код использование векторизованных операций вместо циклов для обработки нескольких пар судов одновременно, что позволит ускорить быстрое действие. Применение разработанного в данной работе скрипта позволит создать обучающую выборку для нейронной сети, прогнозирующей необходимые изменения скоростей и / или курсов пар судов для их безопасного расхождения, что позволит СУДС обрабатывать большие массивы данных с большей эффективностью.

Цель работы достигнута: описан подход к решению проблемы расхождения двух безэкипажных судов в определенной акватории.

Задачи работы выполнены: создан скрипт, позволяющий рассчитывать маневры расхождения на безопасной дистанции для двух опасно сближающихся судов в определенной акватории; его работоспособность и эффективность доказана путем симуляции и построении графиков в MATLAB.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chauvin C. Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS / C. Chauvin, S. Lardjane, G. Morel, J. P. Clostermann, B. Langard // *Accident Analysis & Prevention*. — 2013. — Vol. 59. — Pp. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
2. 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.
3. Huang Y. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art / Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R. R. Negenborn, P. H. A. J. M. Van Gelder // *Safety science*. — 2020. — Vol. 121. — Pp. 451–473. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.
4. Bertaska I. R. Experimental evaluation of automatically-generated behaviors for USV operations / I. R. Bertaska, B. Shah, K. von Ellenrieder, P. Švec, W. Klinger, A. J. Sinisterra, M. Dhanak, S. K. Gupta // *Ocean Engineering*. — 2015. — Vol. 106. — Pp. 496–514. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.002.
5. Wright R. G. Intelligent autonomous ship navigation using multi-sensor modalities / R. G. Wright // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2019. — Vol. 13. — No. 3. — Pp. 503–510. DOI: 10.12716/1001.13.03.03.
6. Li Y. Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel / Y. Li, J. Zheng // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. — 2021. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 511–520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
7. Praczyk T. Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle / T. Praczyk // *Neurocomputing*. — 2015. — Vol. 149. — Pp. 559–572. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.08.018.
8. 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.
9. Букатый В. М. Точностные характеристики метода непосредственного определения дистанции кратчайшего сближения судов по информации от АИС / В. М. Букатый, С. Ю. Морозова // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2012. — № 2 (68). — С. 9–15.
10. Коккрофт А. Н. Толкование МППСС-72 / А. Н. Коккрофт, Д. Н. Ламейер; Пер. с англ. Н. Я. Брызгина и Н. Т. Шайхутдинова; под. ред. Н. Я. Брызгина. — М.: Транспорт, 1981. — 280 с.
11. Триполец О. Ю. Моделирование маневра расхождения двух судов в компьютерной среде MATLAB / О. Ю. Триполец // *Математические модели техники, технологий и экономики: материалы Всероссийской студенческой научно-практической конференции, г. Санкт-Петербург, 08 июня 2023 г.* — СПб.: СПбГЛТУ, 2023. — С. 16–21.
12. 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.

REFERENCES

1. Chauvin, Christine, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, and Benoît Langard. “Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS.” *Accident Analysis & Prevention* 59 (2013): 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.
2. 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.
3. Huang, Yamin, Linying Chen, Pengfei Chen, Rudy R. Negenborn, and P.H.A.J.M. van Gelder. “Ship collision avoidance methods: State-of-the-art.” *Safety science* 121 (2020): 451–473. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.

4. Bertaska, Ivan R., Brual Shah, Karl von Ellenrieder, Petr Švec, Wilhelm Klinger, Armando J. Sinisterra, Manhar Dhanak, and Satyandra K. Gupta. "Experimental evaluation of automatically-generated behaviors for USV operations." *Ocean Engineering* 106 (2015): 496–514. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.002.
5. Wright, R. Glenn. "Intelligent autonomous ship navigation using multi-sensor modalities." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 13.3 (2019): 503–510. DOI: 10.12716/1001.13.03.03.
6. Li, Yun, and Jian Zheng. "Deep learning structure for collision avoidance planning of unmanned surface vessel." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 235.2 (2021): 511–520. DOI: 10.1177/1475090220970102.
7. Praczyk, Tomasz. "Neural anti-collision system for Autonomous Surface Vehicle." *Neurocomputing* 149 (2015): 559–572. DOI: 10.1016/j.neucom.2014.08.018.
8. 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.
9. Bukaty, V. M., and S. Y. Morozova. "Direct determination of the close-quarter distance on the basis of importation received from automatic identification systems." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(68) (2012): 9–15.
10. Cockcroft, A. N., and J.N.F. Lameijer. *A Guide to the Collision Avoidance Rules*. 7th edition. Butterworth-Heinemann, 2012.
11. Tripolets, O. Yu. "Modelirovanie manevra raskhozhdeniya dvukh sudov v komp'yuternoi srede MATLAB." *Matematicheskie modeli tekhniki, tekhnologii i ekonomiki: materialy Vserossiiskoi studencheskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: SPbGLTU, 2023. 16–21.
12. 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.

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 25 июня 2023 г.
Received: June 25, 2023.