

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848

A CONTROL SYSTEM FOR MOVEMENT AND DIVERGENCE OF UNMANNED SHIP ACCORDING TO COLREG

I. I. Pushkarev

Maritime State University named after admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

A variant of unmanned ship control system with obstacle avoidance in accordance with International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREG) is proposed in the paper. The system consists of three subsystems: trajectory control subsystem, obstacle avoidance subsystem, course and speed control subsystem. The trajectory control subsystem generates a course that allows you to move along a predetermined trajectory. A gradient vector of the auxiliary function algorithm is used for this. In this algorithm, the alfa weight coefficient, which determines the degree of convergence of the unmanned ship to a given trajectory, is set. To ensure more efficient control convergence of the unmanned ship to a given trajectory, it is proposed to use the variable value of alfa, which depends on the condition of the coincidence of the unmanned ship course with the direction of the route and the value of alfa change for one iteration. The obstacle avoidance subsystem is based on the method of Velocity Obstacles, when all variants of the unmanned ship velocity vectors, at which a collision with an obstacle in the future is possible, are determined provided that the obstacle does not maneuver. The subsystem is activated when a dangerous situation occurs. The distance of the closest approach to the obstacle and the time of following to the point of the closest approach are calculated for identify a dangerous situation. Also, the subsystem implements a mechanism for determining the type of dangerous situation and compliance with COLREG. In total, four basic avoidance scenarios have been identified: head-on, crossing (obstacle moves to the left or right), and overtaking. To perform collision avoidance, the cost function of all variants of the course and speed is calculated, and the best variant is selected. The selected course and speed are transmitted to the course and speed control subsystem. The system is implemented in the Matlab / Simulink modeling environment. The simulation results confirmed the operability of the system, which ensures the movement of the unmanned ship along a given route and avoidance obstacles in case of dangerous situations in accordance with COLREG.

Keywords: unmanned ship, COLREG, control system, algorithm, vector field, collision avoidance, trajectory, route, velocity obstacle, modeling.

For citation:

Pushkarev, Igor I. "A control system for movement and divergence of unmanned ship according to COLREG." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 837–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848.

УДК 681.5

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ И РАСХОЖДЕНИЕМ БЕЗЭКИПАЖНОГО СУДНА В СООТВЕТСТВИИ С МППСС–72

И. И. Пушкарёв

Морской Государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

В работе предложена система управления движением и расхождением безэкипажного судна с препятствиями в соответствии с Международными правилами предупреждения столкновения судов в море (МППСС–72). Данная система состоит из трех подсистем: подсистемы удержания траектории, подсистемы обхода препятствий, подсистемы удержания курса и скорости. Подсистема удержания траектории формирует курс, позволяющий двигаться по заранее заданной траектории. Для этого используется алгоритм градиента вспомогательной функции. В этом алгоритме задается весовой коэффициент α , определяющий степень схождения БЭС к заданной траектории. Для обеспечения более эффективного управления схождения БЭС к заданной траектории предлагается использовать переменное значение α ,

которое зависит от условия совпадения курса безэкипажного судна с направлением маршрута и значением изменения α за одну итерацию. Отмечается, что подсистема обхода препятствий основана на методе скоростных препятствий, когда определяются варианты векторов скоростей безэкипажного судна, при которых возможно столкновение с препятствием в будущем, при условии, что оно не маневрирует. Данная подсистема активируется при условии возникновения опасной ситуации, для определения которой вычисляются расстояние кратчайшего сближения с препятствием и время следования до точки кратчайшего сближения. Также в подсистеме реализованы механизмы определения вида опасной ситуации и соблюдения правил МППСС–72 при выполнении расхождения. Всего выделено четыре базовых сценария расхождения: расхождение встречными курсами, пересечение курсов (препятствие движется слева или справа) и обгон. Для выполнения расхождения, позволяющего обойти препятствия, рассчитывается стоимостная функция допустимых вариантов курса и скорости безэкипажного судна и выбирается оптимальный вариант. Выбранный курс и скорость передаются на подсистему удержания курса и скорости. Для оценки работоспособности системы управления движением безэкипажного судна выполнена ее проверка в среде моделирования Matlab / Simulink. Результаты моделирования подтвердили работоспособность системы, обеспечивающей движение БЭС по заданному маршруту и расхождение с препятствиями при возникновении опасных ситуаций в соответствии с правилами МППСС–72.

Ключевые слова: безэкипажное судно, МППСС–72, система управления, алгоритм, векторное поле, расхождение, траектория, маршрут, скоростное препятствие, моделирование.

Для цитирования:

Пушкарёв И. И. Система управления движением и расхождением безэкипажного судна в соответствии с МППСС–72 / И. И. Пушкарёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 837–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-837-848.

Введение (Introduction)

Активное развитие технологий автоматических транспортных средств является общемировой тенденцией. С каждым годом человечество приближается к обществу, в котором беспилотный транспорт прочно войдет в повседневную жизнь. Одной из наиболее интенсивно развивающихся и обладающих высокими экономическими перспективами является область безэкипажного судовождения. Постройка надежных и эффективных безэкипажных судов (БЭС) требует решения множества технических задач в сфере систем связи и навигации, бортового оборудования, береговых центров управления, кибербезопасности, систем технического зрения и других элементов.

Важнейшим и не решенным до конца вопросом является разработка безопасного, надежного и универсального алгоритма, который позволит судну совершать движение по заданному маршруту, осуществляя автоматическое расхождение согласно Международным правилам предупреждения столкновения судов в море (далее — правила МППСС–72). Существуют различные подходы в решении вопроса движения и расхождения безэкипажных судов. Каждый из них имеет особенности, а также достоинства и недостатки.

Классические методы движения судна подробно рассмотрены в книге Т. Фоссена [1], включая движение по прямолинейной и криволинейной траектории. В работе [2] предложен подход движения судна на основе градиента вспомогательной функции, обеспечивающий движение судна вдоль заданного маршрута. Предложенный подход получил развитие в статье [3], в которой реализован алгоритм следования по заданной траектории с обходом статических препятствий. В исследовании [4] используется метод скоростных препятствий (Velocity Obstacles), дополненный авторами для возможности применения в составе безэкипажного надводного средства. В нем реализовано использование правил МППСС–72 путем введения дополнительных препятствий, ограничивающих маневрирование надводного средства, что позволяет избежать нарушения соответствующих правил, характерных для текущей ситуации.

Активное развитие получают алгоритмы на основе искусственных нейронных сетей, наиболее распространенным их применением в области безэкипажных технологий является распознавание и идентификация препятствий на видео- и радиолокационных изображениях. Вместе с тем существуют работы, где авторы применяют нейросетевые алгоритмы для расхождения БЭС с препятствиями [5], [6]. Обзор различных методов и алгоритмов расхождения БЭС выполнен в работе [7].

Рассмотрены подходы для расхождения БЭС со статическими и динамическими препятствиями, с одиночными и групповыми объектами, а также с учетом и без учета правил МППСС–72. Сделан вывод об отсутствии в настоящее время алгоритмов, позволяющих решить все существующие задачи автоматического движения БЭС.

В настоящей статье предложен вариант системы, осуществляющей управление движением БЭС по заданной траектории и при обнаружении препятствия, создающего угрозу столкновения, выполняющей расхождение в соответствии с правилами МППСС–72.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общая схема системы (рис. 1) состоит из трех подсистем: подсистемы удержания траектории, подсистемы обхода препятствий, подсистемы удержания курса и скорости.

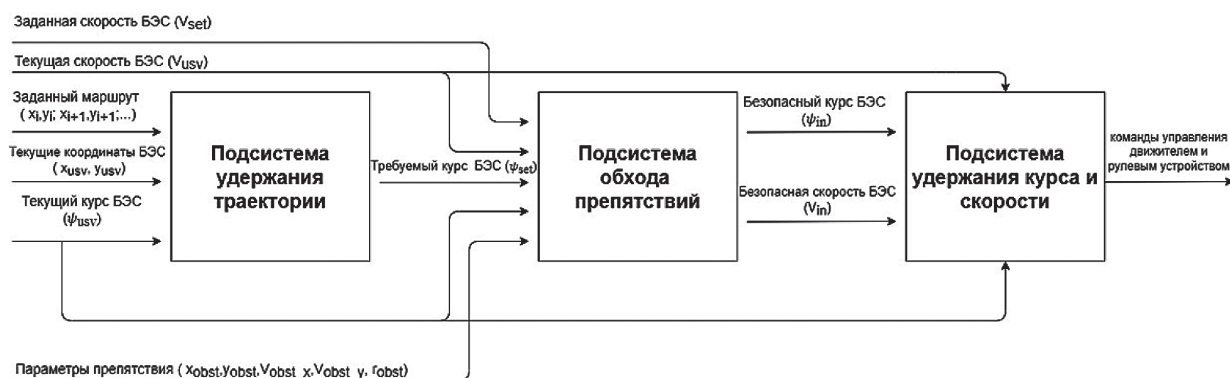


Рис. 1. Общая схема системы управления движением и расхождением БЭС

Подсистема удержания траектории предназначена для управления движением судна по заданной траектории. Она формирует требуемый курс, которому должно следовать безэкипажное судно для движения вдоль заданного маршрута. Входными параметрами данной подсистемы являются: заданный маршрут в виде набора путевых точек с координатами (x_i, y_i) , $i = 0, 1, \dots, n$, текущие координаты безэкипажного судна (x_{usv}, y_{usv}) и текущий курс БЭС ψ_{usv} . В рассматриваемом исследовании используется условная система плоских прямоугольных координат (ось x совпадает с направлением на север, ось y — с направлением на восток, курс отсчитывается от оси y по часовой стрелке).

Алгоритм градиента вспомогательной функции, который является основой подсистемы удержания траектории, формирует векторное поле (рис. 2), показывающее требуемое направление движение судна в конкретной точке.

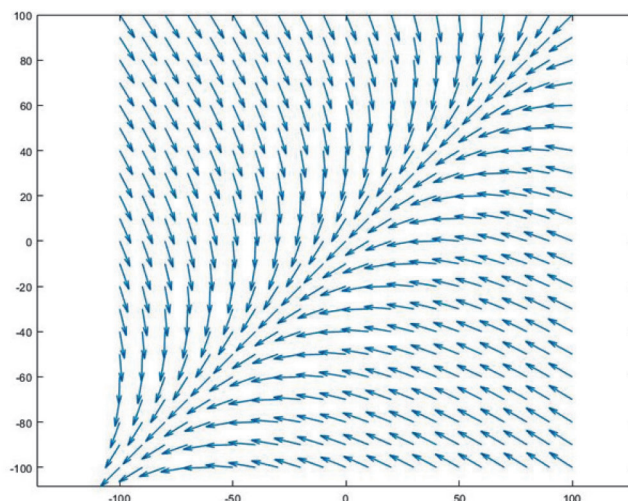


Рис. 2. Пример векторного поля, сформированного подсистемой удержания траектории

Для вычисления требуемого курса БЭС ψ_{set} для движения по заданной траектории используются следующие формулы:

$$\psi_{set} = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \psi'_{set} & \text{для } \psi'_{set} \leq \frac{\pi}{2}; \\ \frac{5\pi}{2} - \psi'_{set} & \text{для } \psi'_{set} > \frac{\pi}{2}; \end{cases}$$

$$\psi'_{set} = \text{atan2} \left(\frac{dF_i}{dy_i} + \text{alfa} \cdot w_{yi}, \frac{dF_i}{dx_i} + \text{alfa} \cdot w_{xi} \right);$$

$$\text{grad}F_i = (-a(ax_{usv} + by_{usv} + c); -b(ax_{usv} + by_{usv} + c)); \quad (1)$$

$$a = (y_i - y_{i+1})\mu; \quad b = (x_i - x_{i+1})\mu; \quad c = (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)\mu;$$

$$\mu = \pm \frac{1}{\sqrt{(y_i - y_{i+1})^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}};$$

$$w_{xi} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}};$$

$$w_{yi} = \frac{y_{i+1} - y_i}{\sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}},$$

где a, b, c — некоторые действительные числа;

μ — нормирующий множитель (берется по знаку, противоположному знаку c);

(w_{xi}, w_{yi}) — вспомогательный вектор единичной длины направленный вдоль траектории движения;

alfa — весовой коэффициент ($\text{alfa} > 0$).

Значение коэффициента alfa определяет «крутизну» схождения векторного поля к прямолинейному участку заданного маршрута. Иначе говоря, насколько активно безэкипажное судно будет приближаться к заданной траектории. В случае большого значения весового коэффициента БЭС будет медленно выходить на заданный участок маршрута и может никогда не дойти до требуемого сближения с заданной траекторией из-за влияния внешних возмущений (течение, ветер). При малом значении коэффициента возможен быстрый выход на маршрут с большими амплитудами перерегулирования удержания заданной траектории.

Для более эффективной работы подсистемы предлагается использовать переменное значение alfa , рассчитываемое по формуле

$$\text{alfa} = \text{alfa} - \text{step}_{\text{alfa}} \quad \text{для } \text{alfa}_{\min} \leq \text{alfa} \leq \text{alfa}_{\max}, \quad (2)$$

где $\text{step}_{\text{alfa}}$ — значение изменения весового коэффициента за одну итерацию;

$\text{alfa}_{\min}$ — минимальное допустимое значение весового коэффициента;

$\text{alfa}_{\max}$ — максимально допустимое значение весового коэффициента.

Данный расчет alfa выполняется с частотой работы системы управления БЭС при условии совпадения текущего курса судна и направления требуемой траектории в следующем диапазоне, в противном случае значение alfa выбирается максимально допустимым:

$$|\psi_{path} - \psi_{usv}| < \psi_{\text{alfa}}, \quad (3)$$

где ψ_{path} — направление текущего участка маршрута;

ψ_{alfa} — минимальная разница текущего и заданного курса БЭС, при котором изменяется значение весового коэффициента.

Требуемый курс БЭС передается на подсистему обхода препятствий, которая рассчитывает безопасный курс ψ_{in} и безопасную скорость V_{in} безэкипажного судна — такие курс и скорость, которые наиболее близки к требуемому курсу и заданной скорости и при этом позволяют осуществлять безопасное движение, которое не приведет к столкновению с препятствием. Соответственно входными параметрами подсистемы являются: требуемый курс ψ_{set} , заданная скорость V_{set} (задается на этапе формирования маршрута), текущий курс БЭС ψ_{usv} , текущая скорость БЭС V_{usv} , текущие координаты препятствия (x_{obst}, y_{obst}) , текущая скорость препятствия (V_{obst_x}, V_{obst_y}) , радиус окружности, описывающей препятствие r_{obst} .

Подсистема обхода препятствий выполняет свою функцию в случае возникновения опасной ситуации. В противном случае она не выполняет вычислений и передает входные данные транзитом:

$$\psi_{in} = \psi_{set}, V_{in} = V_{set}. \quad (4)$$

Для определения момента начала опасной ситуации вычисляется расстояние кратчайшего сближения с препятствием D_{CPA} и время следования до точки кратчайшего сближения T_{CPA} . Условием работы контроллер обхода препятствий является:

$$0 \leq T_{CPA} \leq T_{min} \text{ и } D_{CPA} \leq D_{min}, \quad (5)$$

где T_{min} — параметр, определяющий минимальное безопасное время сближения;

D_{min} — параметр, определяющий минимальную безопасную дистанцию сближения.

Правила МППСС–72 учитываются в подсистеме обхода препятствий. Они состоят из нескольких частей, описывающих различные области судоходства [8]. Применительно к БЭС наиболее актуальными являются правила, относящиеся к ч. В (разд. I — правило 8, разд. II — правила 13–17).

Основными ситуациями расхождения, регламентированными правилами, которые должны учитываться при разработке подсистемы обхода препятствий, являются: обгон, расхождение на встречных курсах и пересечение курсов (рис. 3).

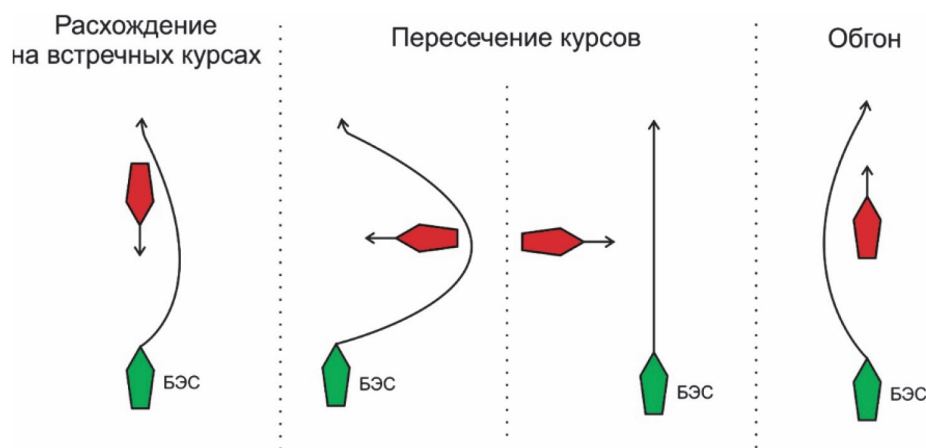


Рис. 3 Основные ситуации расхождения, регламентированные в МППСС–72

При движении встречными курсами суда должны изменить свой курс так, чтобы каждое из них могло пройти у другого по левому борту. В случае пересечения курсов судно, имеющее другое на своей правой стороне, должно уступить ему дорогу. В ситуации обгона каждое судно, обгоняющее другое, должно держаться в стороне от пути обгоняемого судна. Правила не регламентируют с какой стороны следует совершать обгон, но в хорошей морской практике принято оставлять обгоняемого с правой стороны.

Для определения, к какому правилу МППСС–72 относится возникшая ситуация, рассчитывается относительный угол β между курсом БЭС и курсом движущегося препятствия, представляющего опасность:

$$\beta' = (\text{mod}(\psi_{usv} + \pi, 2\pi) - \pi) - \text{atan2}(V_{obst_x}, V_{obst_y});$$

$$\beta = \begin{cases} \beta' - 2\pi & \text{для } \beta' \geq \pi; \\ \beta' + 2\pi & \text{для } \beta' \leq -\pi, \end{cases} \quad (6)$$

где mod — операция вычисления остатка от деления.

В случае ситуации обгона параметры четко определены правилами МППСС–72 (судно считается обгоняющим другое судно, когда оно подходит к нему с направления более 22,5 град., позади траверза последнего). Для определения ситуации расхождения на встречных курсах используется диапазон углов $\pm 15^\circ$, успешно примененный в работах [9], [10].

Выделим четыре диапазона β , характерных для каждой определенной ситуации: расхождение на встречных курсах, $\beta \in (180^\circ, 165^\circ)$ или $\beta \in (-180^\circ, -165^\circ)$; пересечение курсов (препятствие движется слева); $\beta \in (-165^\circ - 67,5^\circ)$; пересечение курсов (препятствие движется справа): $\beta \in (165^\circ, 67,5^\circ)$; обгон: $\beta \in (67,5^\circ - 67,5^\circ)$. Необходимо учитывать, что корректное определение ситуации расхождения по углу β может быть только при выполнении условия возникновения опасной ситуации (5).

Подсистема обхода препятствий работает на базе метода скоростных препятствий, который впервые был опубликован Paolo Fiorini и Zvi Shiller в 1998 г. [11]. Он предназначен для планирования движения роботов и уклонений от столкновений с другими подвижными или статическими объектами. Данный метод позволяет определить все варианты векторов скоростей, при которых возможно столкновение с препятствием в будущем, при условии, что препятствия не маневрируют. Эти вектора скорости располагаются в пространстве, называемом *скоростным препятствием* (VO), которое графически изображается в виде конуса. Для предотвращения столкновения необходимо выбирать вектор скорости вне скоростного препятствия. В 2011 г. Yoshiaki Kuwata, Michael T. Wolf, Dimitri Zarzhitsky, Terrance L. Huntsberger дополнили алгоритм в соответствии с правилами МППСС–72.

Примем, что БЭС имеет положение P_A и вектор скорости V_A , препятствия, соответственно, P_B и V_B . Тогда относительное положение $P_{AB} = P_B - P_A$, относительная скорость $V_{BA} = V_A - V_B$. Скоростное препятствие делит пространство скоростей на четыре области (рис. 4): непосредственно скоростное препятствие VO в виде конуса и области $V1$, $V2$, $V3$.

Условием присутствия вектора скорости БЭС внутри скоростного препятствия является:

$$V_A \in VO \text{ при } V_{BA} \cdot P_{ABL} \geq 0 \text{ и } V_{BA} \cdot P_{ABR} \geq 0;$$

$$P_{ABL} = R\left(-\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \frac{P_{AB}}{P_{AB}}$$

$$P_{ABR} = R\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \frac{P_{AB}}{P_{AB}}; \quad (7)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix};$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{r_{usv} + r_{obst}}{P_{AB}}\right),$$

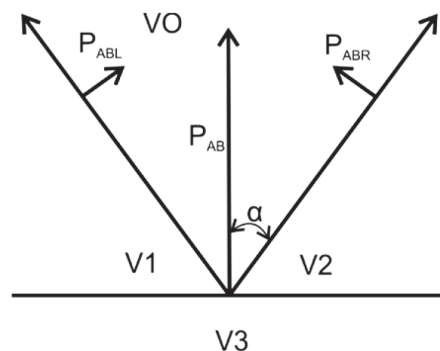


Рис. 4. Области пространства скоростей

где P_{ABL} и P_{ABR} — вектора, перпендикулярные границам скоростного препятствия;

$R(\theta)$ — матрица поворота;

r_{usv} и r_{obst} — радиусы окружностей, описывающие БЭЖ и препятствие соответственно;

α — угол между границами VO и P_{AB} .

Для вычисления принадлежности Va определенной области используются формулы:

$$Va \in V3 \text{ при } P_{AB} \cdot V_{BA} < 0;$$

$$Va \in V2 \text{ при } Va \notin VO \text{ и } Va \notin V1 \text{ и } Va \notin V2; \quad (8)$$

$$Va \in V1 \text{ при } Va \notin VO \text{ и } Va \notin V1 \text{ и } P_{AB} \cdot V_{BA} < 0.$$

Для уклонения от столкновения с препятствием требуется выбирать вектор скорости БЭС за пределами области VO , а для соответствия правилам МППСС–72 в различных ситуациях необходимо соблюдать выполнение следующих условий: для ситуации расхождения на встречных курсах необходимо, чтобы вектор скорости был в области $V2$, что будет соответствовать расхождению левыми бортами; при пересечении курсов, когда препятствие движется справа, требуется выбрать вектор скорости также в области $V2$, что позволит уступить движущемуся объекту или обойти его через корму. В других вариантах ситуаций правил МППСС–72 в общем случае не имеет значение выбор конкретных областей пространства скоростей. Однако в ситуации обгона рекомендуется выбирать область $V1$ для соответствия *хорошей морской практике*, т. е. оставлять обгоняемого с правой стороны.

Вместе с тем необходимо учитывать, что высшим приоритетом является *уклонение от столкновения*, даже если это будет противоречить правилам МППСС–72 в сложившейся ситуации. В подсистеме обхода препятствий используется двумерная сетка возможных вариантов векторов скоростей в виде пары (V_i, ψ_j) . Скорость и курс линейно масштабированы с заданным интервалом и в заданном диапазоне. Для каждого варианта вектора скорости рассчитывается стоимостная функция:

$$C = k_1 U_{i,j}^T U_{i,j} + k_2 F_{collision}(V_i, \psi) + k_3 F_{COLREG}(V_i, \psi_j);$$

$$U_{i,j} = \begin{bmatrix} V_{set} \cos(\psi_{set}) - V_i \cos(\psi_j); \\ V_{set} \sin(\psi_{set}) - V_i \sin(\psi_j); \end{bmatrix} \quad (9)$$

где k_1, k_2, k_3 — постоянные коэффициенты;

$U_{i,j}$ — вектор ошибки;

$F_{collision}$ — логическая функция опасной ситуации;

F_{COLREG} — логическая функция правил МППСС–72.

Логическая функция опасной ситуации $F_{collision}$ возвращает единицу, если используемый вектор скорости находится в состоянии *скоростного препятствия*, т. е. возможно столкновение БЭС с препятствием. Логическая функция правил МППСС–72 F_{COLREG} возвращает единицу, если при используемом векторе скорости возможно столкновение или данный маневр приводит к нарушению правил МППСС–72. Выбирается вектор с минимальным значением, максимально близкий к требуемому курсу и заданной скорости, который при этом позволяет разойтись с препятствием с соблюдением правил МППСС–72.

Далее выбранный безопасный курс ψ_{in} и безопасная скорость V_{in} передаются в качестве входных параметров на подсистему удержания курса и скорости, которая, в свою очередь, вырабатывает команды управления для движителя и рулевого устройства, обеспечивая удержание заданных параметров.

Результаты (Results)

Для проверки работоспособности и эффективности предлагаемой системы управления было проведено численное моделирование. В среде Matlab / Simulink построена модель для исследования разработанной системы. Для моделирования динамики судна по курсу использовались данные,

полученные в статье [12]. Модель динамики продольного движения судна принимается как идеальная. Частота работы системы управления составляет 10 Гц.

В исследуемой реализации используется диапазон возможных скоростей 1–10 м/с с шагом 1 м/с и диапазоном возможных курсов 0–360° с шагом 1°. На рис. 5 показан пример полученной сетки вариантов курсов и скоростей в одной из ситуаций расхождения. Цветом отмечено значение элементов сетки, из которых будет выбрано минимальное, соответствующее безопасному курсу и скорости БЭС.

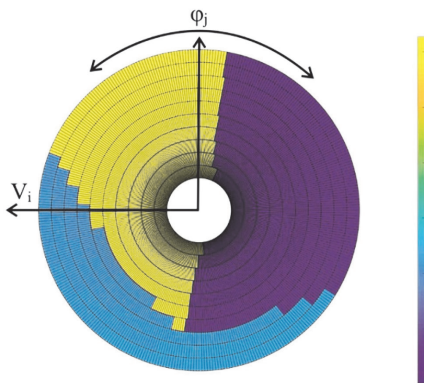


Рис. 5. Сетка вариантов курсов и скоростей

Моделирование ситуации расхождения БЭС с препятствием на встречных курсах показано на рис. 6 (БЭС обходит подвижное препятствие слева с соблюдением правил МППСС–72).

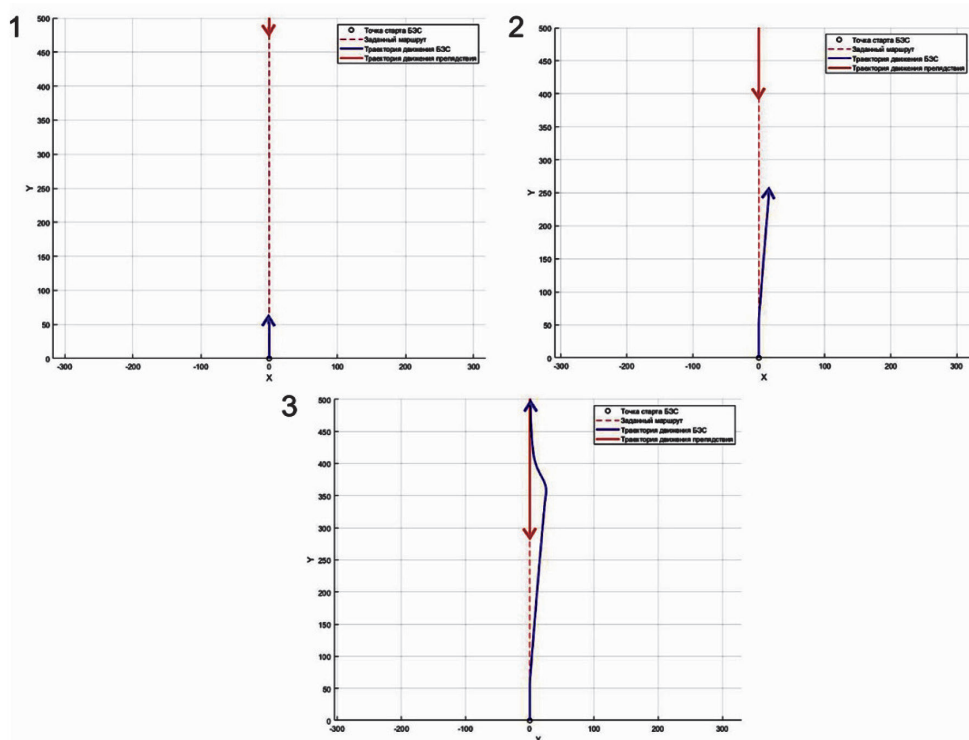


Рис. 6. Движение и расхождение БЭС с препятствием на встречных курсах

($V_{set} = 5$ м/с, $V_{obst_x} = 0$ м/с, $V_{obst_y} = -2$ м/с, $r_{usv} = 15$ м, $r_{obst} = 10$ м, $D_{min} = 100$, $T_{min} = 60$):

1 — старт ситуации расхождения на встречных курсах; 2 — изменение БЭС траектории для расхождения с препятствием левым бортом; 3 — возвращение БЭС на заданную траекторию

Расхождение БЭС в ситуации пересечения курсов, когда препятствие находится справа и слева, показано, соответственно, на рис. 7 и 8. При движении препятствия справа БЭС меняет курс,

уступая дорогу и обходя препятствие через корму. В ситуации, когда препятствие пересекает курс, двигаясь слева, БЭС пытается пройти, не уступая ему, но при этом незначительно меняет курс для уклонения от столкновения.

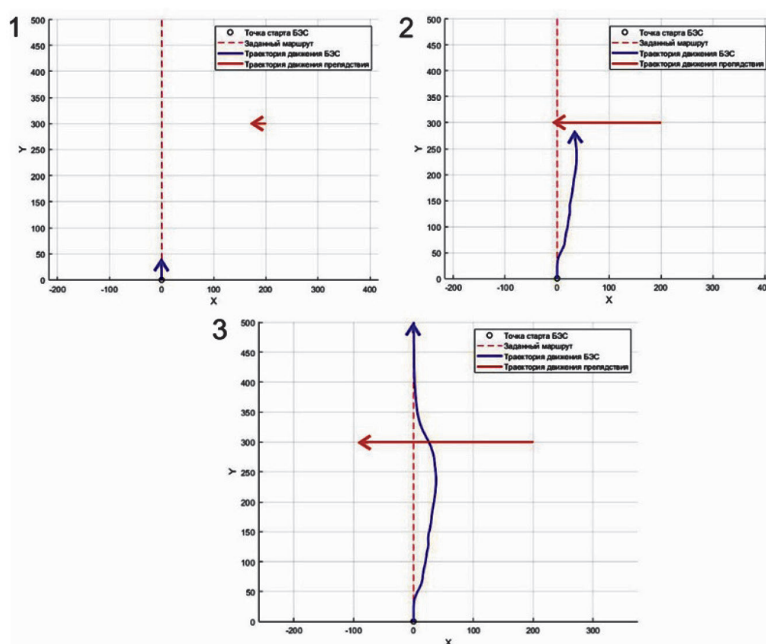


Рис. 7. Движение и расхождение БЭС с препятствием справа при пересечении курсов ($V_{set} = 5$ м/с, $V_{obst_x} = -2$ м/с, $V_{obst_y} = 0$ м/с, $r_{usv} = 15$ м, $r_{obst} = 10$ м, $D_{min} = 100$, $T_{min} = 60$):
1 — старт ситуации пересечения курсов (препятствие справа); 2 — изменение БЭС траектории с обходом препятствия через корму; 3 — возвращение БЭС на заданную траекторию

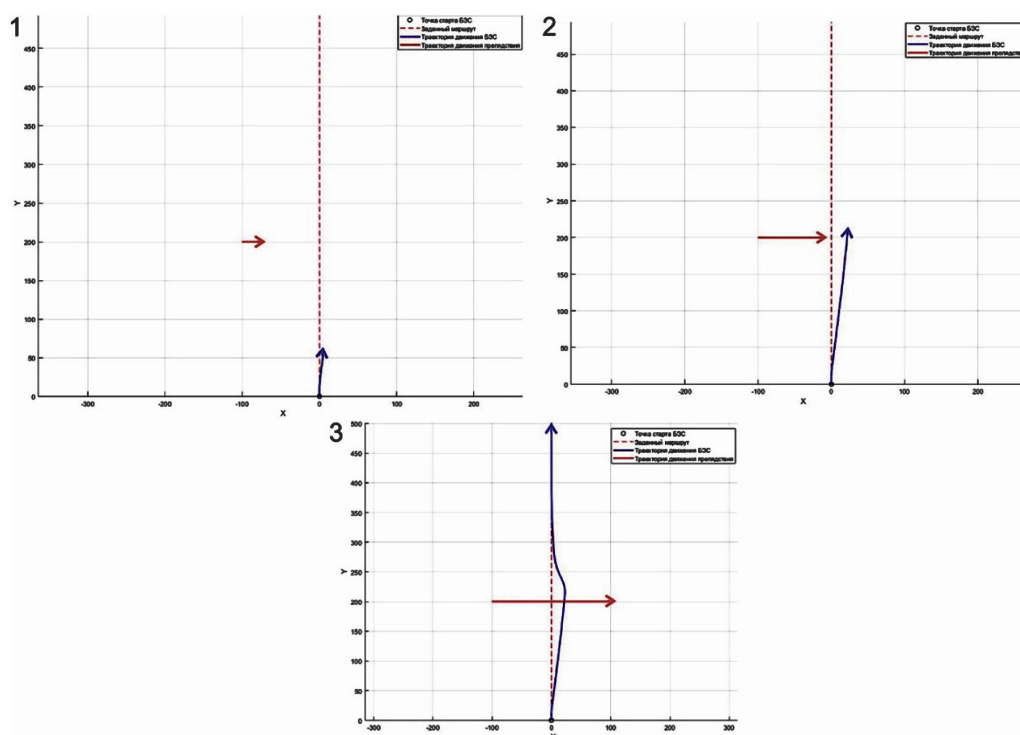


Рис. 8. Движение и расхождение БЭС с препятствием слева при пересечении курсов ($V_{set} = 5$ м/с, $V_{obst_x} = 2$ м/с, $V_{obst_y} = 0$ м/с, $r_{usv} = 15$ м, $r_{obst} = 10$ м, $D_{min} = 100$, $T_{min} = 60$):
1 — старт ситуации пересечения курсов, когда препятствие слева; 2 — препятствие «не уступает» БЭС, нарушая правила МППСС-72; изменение траектории БЭС при уклонении от столкновения с препятствием; 3 — возвращение БЭС на заданную траекторию

Моделирование ситуации, при которой БЭС совершает обгон препятствия, оставляя его справа, показано на рис. 9.

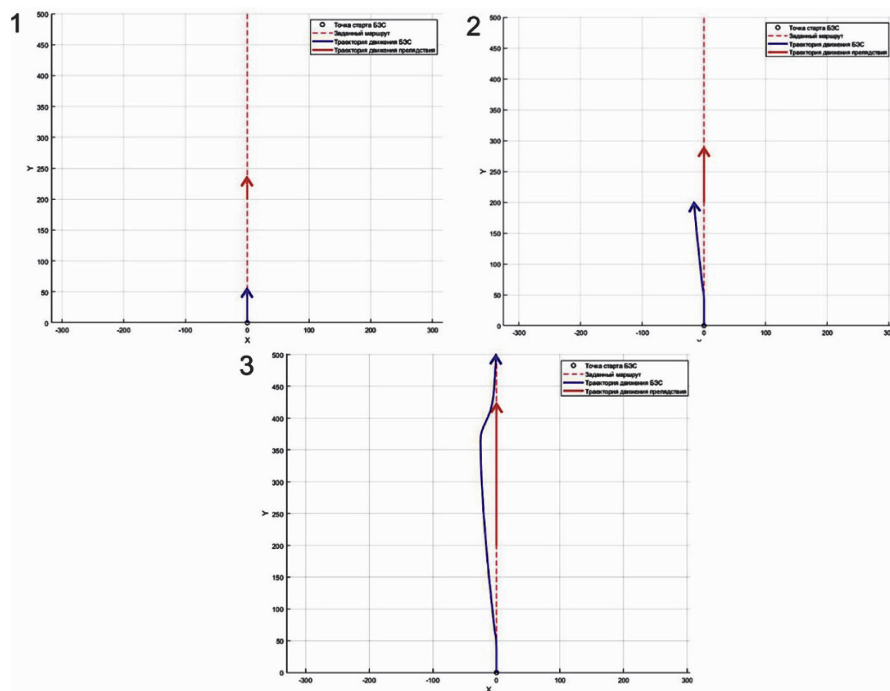


Рис. 9. Движение и расхождение БЭС с препятствием при обгоне
($V_{set} = 5$ м/с, $V_{obst_x} = 0$ м/с, $V_{obst_y} = 2$ м/с, $r_{usv} = 15$ м, $r_{obst} = 10$ м, $D_{min} = 100$, $T_{min} = 60$):
1 — старт ситуации «обгон»; 2 — изменение траектории БЭС для обгона препятствия;
3 — возвращение БЭС на заданную траекторию

Созданная модель разработанной системы управления в среде Matlab/Simulink позволила провести исследование ее работы и оценить корректность выполняемых маневров БЭС при движении и выполнении основных сценариев расхождения.

Заключение (Conclusion)

В работе предложен и исследован вариант системы управления движением безэкипажного судна, которая позволяет БЭС двигаться по заданной траектории и при обнаружении препятствия расходиться с ним соблюдая правила МППСС–72.

Рассматриваемая система состоит из трех подсистем, взаимодействующих между собой. Подсистема удержания траектории формирует курс, позволяющий безэкипажному судну двигаться по заранее заданному прямолинейному участку маршрута, для формирования которого используется алгоритм градиента вспомогательной функции, дополненный переменным весовым коэффициентом. Сформированный курс передается на подсистему обхода препятствий как один из входных параметров, основанную на использовании метода скоростных препятствий, дополненного с учетом правил МППСС–72. Подсистема обхода препятствий активируется в случае возникновения опасной ситуации, вырабатывая безопасный курс и скорость БЭС, которые, в свою очередь, передаются на подсистему, обеспечивающую удержание безопасного курса и скорости БЭС.

Результаты математического моделирования показали работоспособность предложенной системы управления движением БЭС. Безэкипажное судно способно двигаться по заданному маршруту. При возникновении опасной ситуации запускается подсистема обхода препятствий, которая осуществляет расхождение БЭС с препятствием и возвращение на заданную траекторию. Были промоделированы базовые сценарии расхождения: расхождение встречными курсами, пересечение курсов и обгон. Все проверенные сценарии соответствовали заложенным в систему правилам МППСС–72.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control / T. I. Fossen. — John Wiley & Sons, 2011. — 582 p.
2. Дыда А. А. Подход к управлению судном по траектории на основе градиента вспомогательной функции / А. А. Дыда, К. Н. Чумакова, И. И. Пушкарёв // Научные проблемы водного транспорта. — 2020. — № 65. — С. 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125.
3. Дыда А. А. Алгоритм обхода статических препятствий для безэкипажного судна / А. А. Дыда, И. И. Пушкарёв, К. Н. Чумакова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.
4. Kuwata Y. Safe maritime navigation with COLREGS using velocity obstacles / Y. Kuwata, M. T. Wolf, D. Zarghitzky, T. L. Huntsberger // 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. — IEEE, 2011. — Pp. 4728–4734. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094677.
5. Sawada R. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces / R. Sawada, K. Sato, T. Majima // Journal of Marine Science and Technology. — 2021. — Vol. 26. — Is. 2. — Pp. 509–524. DOI: 10.1007/s00773-020-00755-0.
6. Shi J. Deep Learning in Unmanned Surface Vehicles Collision-Avoidance Pattern Based on AIS Big Data with Double GRU-RNN / J. Shi, Z. Liu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2020. — Vol. 8. — Is. 9. — Pp. 682. DOI: 10.3390/jmse8090682.
7. Триполец О. Ю. Обзор существующих методов расхождения безэкипажных судов / О. Ю. Триполец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 4. — С. 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
8. Шарлай Г. Н. МППСС-72 с комментариями: учебное пособие / Г. Н. Шарлай. — М.: Моркнига, 2017. — 136 с.
9. Colito J. Autonomous mission planning and execution for unmanned surface vehicles in compliance with the marine rules of the road: thesis / J. Colito. — Washington: University of Washington, 2007. — 58 p.
10. Benjamin M. R. A method for protocol-based collision avoidance between autonomous marine surface craft / M. R. Benjamin, J. J. Leonard, J. A. Curcio, P. M. Newman // Journal of Field Robotics. — 2006. — Vol. 23. — Is. 5. — Pp. 333–346. DOI: 10.1002/rob.20121.
11. Fiorini P. Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles / P. Fiorini, Z. Shiller // The International Journal of Robotics Research. — 1998. — Vol. 17. — Is. 7. — Pp. 760–772. DOI: 10.1177/027836499801700706.
12. Дыда А. А. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных / А. А. Дыда, К. Н. Пляшешник, И. И. Пушкарёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.

REFERENCES

1. Fossen, Thor I. *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control*. John Wiley & Sons, 2011.
2. Dyda, Alexander A., Ksenya N. Chumakova, and Igor I. Pushkarev. “Auxiliary function gradient approach to marine vehicle path-following control.” *Russian Journal of Water Transport* 65 (2020): 27–36. DOI: 10.37890/jwt.vi65.125.
3. Dyda, Aleksandr A., Igor I. Pushkarev, and Ksenya N. Chumakova. “Static obstacles avoidance algorithm for unmanned ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 307–315. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-307-315.
4. Kuwata, Yoshiaki, Michael T. Wolf, Dimitri Zarghitzky, and Terrance L. Huntsberger. “Safe maritime navigation with COLREGS using velocity obstacles.” *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2011. DOI: 10.1109/IROS.2011.6094677.
5. Sawada, Ryohei, Keiji Sato, and Takahiro Majima. “Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces.” *Journal of Marine Science and Technology* 26.2 (2021): 509–524. DOI: 10.1007/s00773-020-00755-0.
6. Shi, Jia-hui, and Zheng-jiang Liu. “Deep Learning in Unmanned Surface Vehicles Collision-Avoidance Pattern Based on AIS Big Data with Double GRU-RNN.” *Journal of Marine Science and Engineering* 8.9 (2020): 682. DOI: 10.3390/jmse8090682.

7. Tripolets, Oleg Y. “Overview of existing methods of autonomous vessels collision avoidance.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.4 (2021): 480–495. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-4-480-495.
8. Sharlai, G.N. *MPPSS-72 s kommentariyami: uchebnoe posobie*. M.: Morkniga, 2017.
9. Colito, James. Autonomous mission planning and execution for unmanned surface vehicles in compliance with the marine rules of the road. Thesis. University of Washington, 2007.
10. Benjamin, Michael R., John J. Leonard, Joseph A. Curcio, and Paul M. Newman. “A method for protocol-based collision avoidance between autonomous marine surface craft.” *Journal of Field Robotics* 23.5 (2006): 333–346. DOI: 10.1002/rob.20121.
11. Fiorini, Paolo, and Zvi Shiller. “Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles.” *The international journal of robotics research* 17.7 (1998): 760–772. DOI: 10.1177/027836499801700706.
12. Dyda, Alexander A., Ksenya N. Pliasheshnik, and Igor I. Pushkarev. “Developing a model of the dynamics of an unmanned vessel on course based on the experimental data.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пушкарёв Игорь Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Дыда Александр Александрович —
доктор технических наук, профессор
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: B_r_i_g88@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pushkarev, Igor I. — Postgraduate
Supervisor:
Dyda, Aleksandr A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Maritime State University named
after admiral G. I. Nevelskoy
50a, Verhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: B_r_i_g88@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 сентября 2022 г.
Received: September 23, 2022.