

Маневр расхождения судна снижением скорости активным торможением

Е. Л. Волков

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина
Corresponding author. E-mail: yevvolkov@gmail.com

Paper received 05.12.17; Revised 08.12.17; Accepted for publication 10.12.17.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2017-148V16-26>

Аннотация: Для ситуаций опасного сближения судна с целью в случае необходимости расхождения маневром расхождения снижением скорости судна предложен способ выбора параметров маневра активным торможением с помощью области недопустимых параметров движения судна. Получены аналитические выражения определения оптимальной скорости расхождения, показана реализация предлагаемого способа с помощью компьютерной программы. Корректность предлагаемого способа подтверждена имитационным моделированием.

Ключевые слова: безопасность судоходства, предупреждение столкновения судов, область недопустимых параметров движения судна, расхождение снижением скорости активным торможением.

Введение. Безопасность расхождения судов в значительной мере определяется своевременным выявлением ситуации опасного сближения, а также оперативным выбором корректного маневра расхождения в зависимости от реализовавшейся области взаимных обязанностей. При наличии достаточного водного пространства более предпочтительным является маневр расхождения изменением курса судна, а случае невозможности его проведения из-за навигационных препятствий следует применить маневр расхождения изменением скорости судна.

Краткий обзор публикаций по теме. Работы [1-4] посвящены вопросам совершенствования вопросов выявления ситуации опасного сближения и предупреждения возможного столкновения. В работе [1] рассмотрены различные типы взаимодействия судов при возникновении ситуационных возмущений с разной степенью опасности столкновения. Концепция формирования гибких стратегий расхождения предложена в работе [2], в которой показано, что структура стратегии расхождения зависит от реализовавшегося значения ситуационного возмущения. В работе [3] формализована ситуация чрезмерного сближения судов и предложена стратегия экстренного расхождения. Проблема синтеза оптимальной структуры системы бинарной координации взаимодействия пары опасно сближающихся судов при расхождении исследована в работе [4]. В работе предложено согласованность маневров опасно сближающихся судов оценивать скоростью изменения дистанции кратчайшего сближения.

Теоретическое обоснование автономной судовой системы уклонения от столкновения СА (Collision avoidance) излагается в работе [5]. Наряду с процессом расхождения рассматриваются требования к автономной навигации. Отмечается, что современные исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены в классической или компьютерной категориях, причем классические подходы основаны на математических моделях и алгоритмах. Компьютерные технологии основаны на использовании искусственного интеллекта AI (Artificial Intelligence), который для систем автономного расхождения, рассматриваемых в статье, реализован эволюционными алгоритмами, логикой фuzzi, экспертными методами, нейросетью и комбинациями этих методов — гибридными системы. Работа носит теоретический характер и не содержит рекомендаций практическому судоходству.

В работах [6-8] рассматривается возможность опи-

сания процесса расхождения судов методами дифференциальных игр и отмечается сложность задачи выбора оптимального маневра расхождения из-за многомерности процесса управления движением судна, который к тому же отличается нелинейными и нестационарными характеристиками.

Рассмотренные работы хотя и совершенствуют теоретические вопросы решения проблемы предупреждения столкновений судов, однако не содержат практических предложений по улучшению способов выбора маневров расхождения. Указанный пробел частично восполнен исследованиями по проблеме обеспечения безопасного расхождения судов методами внешнего управления с использованием недопустимых областей курсов или скоростей судов [9], которые могут быть модифицированы для локально независимого управления процессом расхождения. Некоторым аспектам этого вопроса посвящена настоящая статья.

Цель. Целью настоящей статьи является рассмотрение процедуры выбора судном маневра расхождения снижением скорости с помощью области недопустимых параметров движения судна.

Материалы и методы. В ситуации опасного сближения судна с целью в стесненных водах наличие навигационных препятствий могут привести к невозможности расхождения маневром изменения курса и вызывает необходимость использования маневра расхождения снижением скорости судна путем активного или пассивного торможения. Рассмотрим случай активного торможения судна для обеспечения безопасного расхождения. Допустим, начальная ситуация опасного сближения судов для начального момента времени $t_0 = 0$ характеризуется пеленгом α_0 и дистанцией D_0 . При формализации задачи для судна принимаем начальные координаты судна равны 0. Очевидно, начальные координаты цели имеют значения $X_{20} = D_0 \sin \alpha_0$ и $Y_{20} = D_0 \cos \alpha_0$. Торможение судна начинается в момент времени t_0 и в течение времени активного торможения τ скорость судна уменьшается до значения V_{1y} , после чего судно следует с данной скоростью до момента времени кратчайшего сближения, после чего скорость увеличивается до начального значения V_1 . Требуется определить максимальное значение скорости расхождения V_{1y} , которое обозначим V_{1ym} , обеспечивающее равенство дистанции кратчайшего сближения $\min D$ с

предельно-допустимой дистанцией d_d , т. е. $\min D = d_d$. В этом случае потери ходового времени для расхождения будут минимальными.

$$\Delta X_1 = S \sin K_1; \Delta Y_1 = S \cos K_1; \Delta X_2 = V_2 t \sin K_2; \Delta Y_2 = V_2 t \cos K_2, \quad (1)$$

где τ и S - соответственно продолжительность переходного процесса и пройденное судном расстояние за это время. Очевидно, на момент времени τ параметры движения судна, как и относительный курс $K_{отр}$, становятся неизменными, а координаты судна и цели определяются следующими выражениями:

$$X_1(\tau) = X_{10} + \Delta X_1 = S \sin K_1; \\ Y_1(\tau) = Y_{10} + \Delta Y_1 = S \cos K_1;$$

$$D_p = \sqrt{(X_1(\tau) - X_2(\tau))^2 + (Y_1(\tau) - Y_2(\tau))^2}; \quad \alpha_p = \arcsin \frac{X_1(\tau) - X_2(\tau)}{D_p} \quad (3)$$

Значения параметров торможения τ и S зависят от пониженной скорости V_{1y} судна, поэтому поиск оптимальной скорости V_{1ym} следует производить с помощью следующего циклического алгоритма. Вначале в качестве V_{1y} выбирается минимальная скорость судна V_{1ym} , близкая или равна нулю, для которой рассчитываются величины τ , S , $K_{отр}$, и с помощью формулы (2-5) вычисляется значения $D_{\min}(V_{1ymin})$. Если значение $D_{\min}(V_{1ymin})$ равно или больше величины d_d , то существует множество допустимых маневров расхождения с помощью снижения скорости V_{1y} . В противном случае следует выбрать маневр расхождения изменением курса и скорости. В случае же справедливости неравенства $D_{\min}(V_{1ymin}) > d_d$ сле-

$$\tau = \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} [\arctg(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_1) - \arctg(\frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{P}} V_{1y})]; \quad S = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + \frac{P}{\mu}}{V_{1y}^2 + \frac{P}{\mu}} \right| \quad (4)$$

где m - масса судна, k - коэффициент присоединенных масс воды, μ - гидродинамический коэффициент сопротивления и P - сила упора винта судна.

В случае $D_{\min}(V_{1ymin}) < d_d$ безопасное расхождение судна с целью невозможно в предельно-допустимой дистанции сближения. Поэтому необходимо выбрать другой курс судна K_{1y} и в случае существования для него безопасного маневра расхождения изменением скорости ему соответствует оптимальная скорость уклонения V_{1ym} , при которой дистанция кратчайшего сближения равна предельно-допустимой дистанции, т. е. $\min D = d_d$. Совокупность точек (K_{1y}, V_{1ym}) являются границей недопустимой области Ω_{dv} , на которой достигается равенство $\min D = d_d$, а внутри - сочетание параметров K_{1y} и V_{1y} не обеспечивают без-

В момент окончания переходного процесса активного торможения приращения координат судна ΔX_1 , ΔY_1 и цели ΔX_2 , ΔY_2 составляют:

$$X_2(\tau) = X_{20} + \Delta X_2 = D_0 \sin \alpha_0 + V_2 t \sin K_2; \\ Y_2(\tau) = D_0 \cos \alpha_0 + V_2 t \cos K_2.$$

Причем дистанция кратчайшего сближения судов:

$$D_{\min} = \text{Abs}[D_p \sin(K_{отр} - \alpha_p)] \quad (2)$$

в которой значения пеленга α_p и дистанции D_p на момент времени τ окончания переходного процесса изменения скорости судна определяются выражениями:

дует увеличить скорость V_{1y} на величину ΔV_{1y} и считать значение $D_{\min}(V_{1ymin} + \Delta V_{1y})$, которое сравнивается с величиной d_d . Скорость V_{1y} пошагово увеличивают до тех пор, пока наступит равенство $D_{\min}(V_{1ymin} + n\Delta V_{1y}) = d_d$. Поэтому $V_{1ymin} + n\Delta V_{1y} = V_{1ym}$ - оптимальное значение скорости расхождения судна.

Результаты и их обсуждение. Для поиска оптимального значения скорости уклонения V_{1ym} судна необходимо располагать аналитическими выражениями для параметров τ и S активного торможения в зависимости от скорости уклонения V_{1y} , которые согласно [9] имеют следующий аналитический вид:

опасного расхождения маневром изменения скорости судна торможением. Найдем процедуру формирования границы области Ω_{dv} , учитывая условие $\min D = d_d$. Подставляем выражение для $\min D$ и получим:

$$\Delta D_p \sin(\alpha_p - K_{отр}) = d_d,$$

где $\Delta = \text{sign}[\sin(\alpha_p - K_{отр})]$.

Из последнего выражения следует:

$$\alpha_p = K_{отр} + \text{Arctg} \frac{d_d}{\Delta D_p},$$

или с учетом выражения (3) для α_p :

$$\text{Arctg} \frac{X_1(\tau) - X_2(\tau)}{D_p} = K_{отр} + \text{Arctg} \frac{d_d}{\Delta D_p},$$

из которого следует:

$$X_2(\tau) = X_1(\tau) - D_p \left[\sin(K_{отр} + \text{Arcsin} \frac{d_d}{\Delta D_p}) \right]$$

или после подстановки $X_2(\tau)$ из выражения (1) получим уравнение:

$$\tau = \frac{1}{V_2 \sin K_2} \{ X_1(\tau) - D_p \left[\sin(K_{отр} + \text{Arcsin} \frac{d_d}{\Delta D_p}) \right] \}$$

Подставляем в последнее уравнение выражение для τ (4):

$$V_{1y} = \sqrt{\frac{P}{\mu}} \text{tg} \left\{ \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_1 \right) - \frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)mV_2 \sin K_2} \left[X_1(\tau) - \left[\sin(K_{отр} + \text{Arcsin} \frac{d_d}{\Delta D_p}) \right] D_p \right] \right\} \quad (5)$$

$$\text{где } D_p = \sqrt{(X_1(\tau) - X_2(\tau))^2 + (Y_1(\tau) - Y_2(\tau))^2}$$

$$X_1(\tau) = S \sin K_{1y} = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + \frac{P}{\mu}}{V_{1y}^2 + \frac{P}{\mu}} \right| \sin K_{1y} \quad Y_1(\tau) = \frac{(1+k)m}{2\mu} \ln \left| \frac{V_1^2 + \frac{P}{\mu}}{V_{1y}^2 + \frac{P}{\mu}} \right| \cos K_{1y}$$

$$X_2(\tau) = D_o \sin \alpha_o + V_2 \sin K_2 \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \left[\text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_1 \right) - \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_{1y} \right) \right]$$

$$Y_2(\tau) = D_o \cos \alpha_o + V_2 \cos K_2 \frac{(1+k)m}{\sqrt{\mu P}} \left[\text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_1 \right) - \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_{1y} \right) \right]$$

Для формирования области Ω_{dv} и расчета ее границ была разработана компьютерная программа. В качестве примера была рассмотрена ситуация опасного сближения судов с параметрами: $D = 3$ мили, $\alpha = 200^\circ$, $K_1 = 120^\circ$, $K_2 = 70^\circ$, $V_1 = 15$ узлов, $V_2 = 20$ узлов, $d_d = 1$ мили, $\min D = 0,1$ мили (рис. 1).

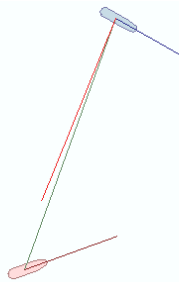


Рис. 1. Ситуация опасного сближения судов

$\text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_{1y} \right) = \text{arctg} \left(\sqrt{\frac{\mu}{P}} V_1 \right) - \rightarrow$
 $-\frac{\sqrt{\mu P}}{(1+k)mV_2 \sin K_2} \{ X_1(\tau) - \left[\sin(K_{отр} + \text{Arcsin} \frac{d_d}{\Delta D_p}) \right] D_p \}$ и
 получим выражение для расчета V_{1y} методом простых итераций:

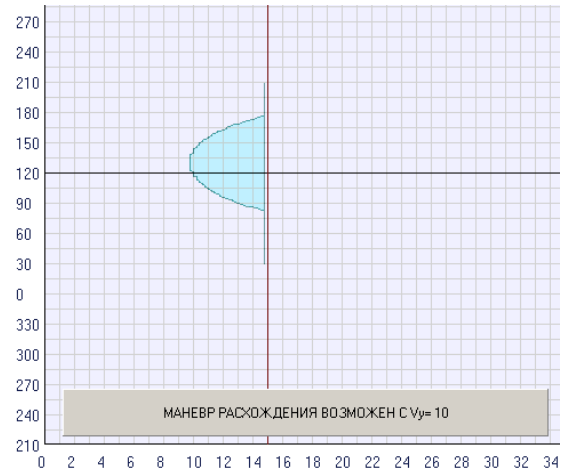


Рис. 2. Область Ω_{dv} недопустимых параметров движения судна

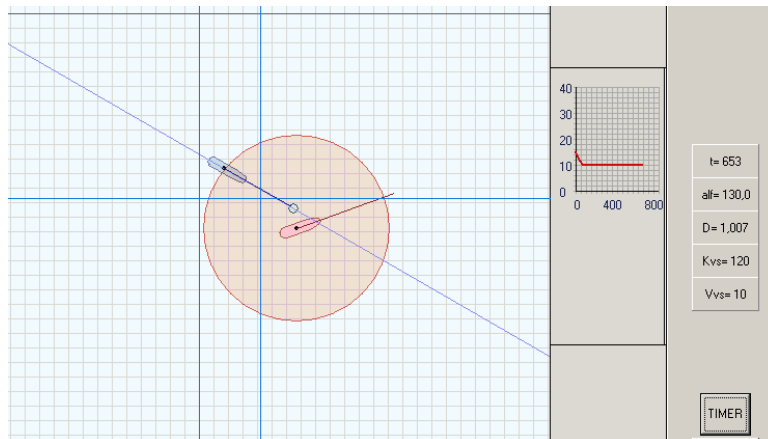


Рис. 3. Результаты имитационного проигрывания маневра расхождения

Граница области Ω_{dv} недопустимых параметров движения судна (K_{1y}, V_{1y}), которая была рассчитана компьютерной программой с помощью уравнения (5), показана на рис. 2.

Как видно из рис. 2, программой выводится сообщение о возможности безопасного расхождения снижением скорости активным торможением до 10 узлов. Это значит, что судно, следуя начальным курсом 120° , начинает активное торможение в нулевой момент времени, и когда скорость судна снизится до 10 узлов, торможение прекращается.

В дальнейшем судно следует скоростью 10 узлов до момента времени кратчайшего сближения, после чего судно увеличивает скорость до начального значения. Анализ области Ω_{dv} показывает, что ее граница пересекает начальный курс 120° в точке с координатой 10 узлов (рис. 2), что подтверждает справедливость выведенного сообщения. В этом случае судно разойдется с целью на дистанции кратчайшего сближения, равной предельно-допустимой дистанции $d_d=1$ миле.

Для проверки корректности выбранного маневра расхождения произведено его имитационное проиг-

рывание, результаты которого представлены на рис. 3. На рисунке отображен момент кратчайшего сближения судна с целью, который наступил на 653 с процесса расхождения, причем дистанция между судном и целью равна 1,007 мили, т. е. предельно-допустимой дистанции сближения, что подтверждает корректность способа определения маневра расхождения.

Выводы

1. Получены формулы расчета границы области недопустимых параметров движения судна, с помощью которой возможен выбор маневра расхождения снижением скорости судна активным торможением, что представляет научную новизну исследования.

2. Показана реализация предложенного способа с помощью компьютерной программы и приведен пример определения оптимальной скорости расхождения, который подтверждает оперативность способа выбора маневра расхождения.

3. Приведен результат проигрывания маневра расхождения имитационным моделированием, который подтверждает корректность предложенного способа определения параметров маневра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбetsкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. – 312 с.
2. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
3. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А.И., Бужбetsкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
4. A. Volkov. Appraisal of the Coordinability of the Vessels for Collision Avoidance Maneuvers by Course Alternation / A. Volkov, E.Pyatarov & A. Yakushev// Activites in Navigation.-Adam Weintrit/ - 2015, P. 195 – 200.
5. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.
6. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. – Vol. 2. – London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.
7. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.
8. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.
9. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.

REFERENCES

1. Pyatakov E.Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A., Kherson: Grin D.S., 2015. - 312 p.
2. Tsymbal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsymbal, I.Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.
3. Burmaka I. Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels / Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 p.
4. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.-LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbrücken (Germany), – 2016. - 585 p.

The maneuver of the ship's passing by decreasing of the vessel's speed by active braking

Ye. L. Volkov

Abstract. For situations of dangerous rapprochement of the vessel with the target, in case of necessity, with maneuver of passing by a decreasing of the vessel's speed, a method of selecting the maneuver parameters by active braking with the help of an area of unacceptable parameters of the ship's motion is suggested in the paper. Analytic expressions for determining the optimal rate of the speed for the safety passing are obtained, and the implementation of the proposed method is given in a computer program. The correctness of the proposed method is confirmed by simulation modeling.

Keywords: safety of navigation, prevention of collision of vessels, area of unacceptable parameters of ship movement, vessel's passing maneuver by decreasing of the speed by active braking.