

Предупреждение столкновений судов методами внешнего управления процессом расхождения

И. А. Бурмака*, Г. Е. Калиниченко, М. А. Кулаков

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина

*Corresponding author. E-mail: burmaka-mob@ukr.net

Paper received 19.06.17; Accepted for publication 28.06.17.

Аннотация. Рассмотрен принцип внешнего управления процессом расхождения судов и его основные достоинства. Показано, что основными методами внешнего управления процессом расхождения судов являются области опасных курсов сближающихся судов и их опасных скоростей, с помощью которых возможны оценка опасности ситуации сближения и выбор маневра расхождения. При выборе безопасных курсов расхождения судов с помощью области опасных курсов предложена процедура учета точечной навигационной опасности.

Ключевые слова: безопасность судоходства, расхождение судов при опасном сближении, внешнее управление процессом расхождения, области опасных курсов и скоростей, точечная навигационная опасность.

Введение. Обеспечение безопасного расхождения судов в ситуации опасного сближения при плавании в стесненных водах является одной из наиболее актуальных проблем безопасности судоходства. В связи с этим стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением для контроля процесса судоходства и управления движением опасно сближающихся судов оборудуются станциями управления движением судов (СУДС), которые должны быть оснащены современными средствами предупреждения столкновения судов, использующими способы безопасного расхождения двух и более судов. Поэтому исследование вопросов управления судами, следующих опасными курсами сближения, в районах контроля СУДС, чему посвящена настоящая статья, является актуальным и перспективным направлением.

Краткий обзор публикаций по теме. В работах [1-6] предложены различные модели формализации взаимодействия судов при расхождении и процедуры расчета безопасного маневра. Применение метода нелинейной интегральной инвариантности предлагается в работе [1], а в работе [2] для описания процесса расхождения используются методы теории оптимальных дискретных процессов. Формализация взаимодействия судов при расхождении в рамках теории дифференциальных игр производится в работах [3, 4]. Обобщению понятия взаимодействия судов при возникновении угрозы столкновения посвящена работа [5], в которой предложена формализация МППСС-72.

В работе [6] глубоко и разносторонне исследована проблема предупреждения столкновений судов и предложен метод гибких стратегий их расхождения, позволяющий формировать оптимальную стратегию расхождения судна с несколькими опасными целями с учетом требований МППСС-72, имеющимися навигационными опасностями и инерционно-тормозными характеристиками судна.

Результаты исследования эффективности парных маневров расхождения приведены в работе [7], а в работе [8] рассмотрено управления тремя судами для безопасного расхождения. Ряд особенностей задачи расхождения судов в море освещен в монографии [9], в которой приведен метод предупреждения столкновения судов путем смещения на параллельную линию пути.

В рассмотренных работах выбор стратегии расхождения судна производится в рамках локально-независимого принципа управления процессом расхождения, который предусматривает возникновение взаи-

модействия между судами при опасном сближении, определяющего их взаимное поведение в процессе расхождения. Взаимодействие судов предлагается формализовать дифференциальной игрой или бинарной координацией, которая, кстати, реализована в МППСС-72 в части маневрирования судов при опасном сближении. Однако, при управлении процессом расхождения судов с помощью СУДС исчезает необходимость во взаимном согласовании маневров судов механизмом взаимодействия, т. е. реализуется принцип внешнего управления процессом расхождения, исследование основных особенностей которого составляет содержание данной статьи.

Цель. Цель настоящей статьи - анализ методов предупреждения столкновений судов при внешнем управлении процессом их расхождения.

Материалы и методы. При управлении процессом расхождения внешний управленец наблюдает ситуацию сближения пары судов и в случае появления угрозы столкновения формирует общую стратегию расхождения для обоих судов, предупреждая их столкновение. Таким управленцем может быть, как СУДС, так и судовая информационная система, с теми же возможностями, установленная на каждом из судов, решающая задачу коллективного расхождения и реализующая полученную в результате решения индивидуальную стратегию. Достоинством полного управления процессом расхождения внешним управленцем является одинаковая интерпретация ситуации опасного сближения при выборе маневров расхождения. Так как при полном управлении в случае опасного сближения выбор стратегии расхождения производится не опасно сближающимися судами, а внешним управленцем, то отсутствует система координации, регламентирующая взаимодействие опасно сближающихся судов (МППСС-72).

В работе [10] показано, что множество состояний пары сближающихся судов целесообразно представлять областью опасных курсов Q_k , которая отображается на расширенной плоскости курсов судов, как показано на рис. 1.

Границами области Q_k являются точки курсов судов (K_1, K_2) , удовлетворяющие уравнению:

$$\sin(K_2 - \theta) = \frac{V_1}{V_2} \sin(K_1 - \theta),$$

где $\theta = \alpha \pm \arcsin \frac{D_d}{D}$; α и D - соответственно пеленг и дистанция между судами;

D_d - предельно-допустимая дистанция сближения судов.



Рис.1. Область опасных курсов Q_k судов

При нахождении точки (K_1, K_2) внутри области опасных курсов Q_k дистанция кратчайшего сближения D_{min} меньше предельно-допустимой дистанции D_d , и сближение судов является опасным. Угроза столкновения отсутствует, если точка (K_1, K_2) находится на границе или вне области Q_k . Если для пары судов точка с программными курсами (K_{1o}, K_{2o}) находится в области Q_k , то необходимо при неизменных скоростях судов изменить их курсы на значения K_{1y} и K_{2y} , при которых точка (K_{1y}, K_{2y}) не принадлежит области опасных курсов, а находится на ее границе. Переход из точки (K_{1o}, K_{2o}) области Q_k в точку (K_{1y}, K_{2y}) , должен соответствовать минимальным изменениям курсов судов.

В ситуации, когда опасно сближающиеся судна не могут изменять свой курс, предупредить столкновение можно изменением их скоростей. В этом случае множество состояний пары сближающихся судов следует графически представить областью опасных скоростей Q_v , которая аналогична области опасных курсов Q_k , с той лишь разницей, что каждой точке (V_1, V_2) парных скоростей судов соответствует дистанция кратчайшего сближения между судами D_{min} . Граница опасной области скоростей, каждая точка которой соответствует дистанции кратчайшего сближения равной предельно-допустимой дистанции, т. е. $D_{min} = D_d$, формализуется выражениями [11]:

$$V_1^* = V_2 \frac{\sin(K_2 - \theta^*)}{\sin(K_1 - \theta^*)}, V_1^* = V_2 \frac{\sin(K_2 - \theta_*)}{\sin(K_1 - \theta_*)},$$

$$\text{где } \theta^* = \alpha - \arcsin \frac{D_d}{D}, \theta_* = \alpha + \arcsin \frac{D_d}{D}.$$

При постоянных значениях курсов судов K_1 и K_2 границы опасной области скоростей являются линейными, как показано на рис. 2.

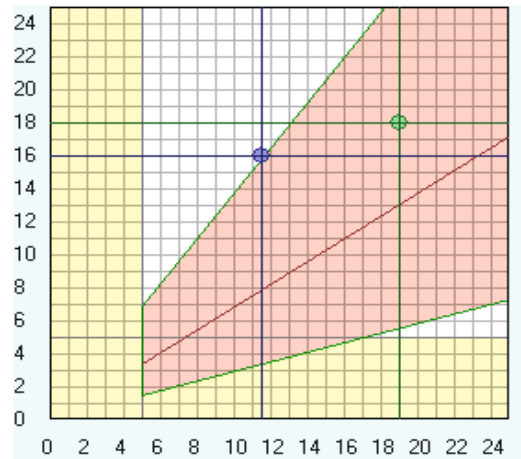


Рис.2. Область опасных скоростей Q_v судов

Область опасных скоростей Q_v судов позволяет оценить опасность их сближения и выбрать скорости, обеспечивающие безопасное расхождение. Как следует из рис. 2, при начальных скоростях судов $V_1 = 18$ узлов и $V_2 = 19$ узлов точка $(V_1, V_2) \in Q_v$ и сближение судов опасно, для безопасного расхождения следует точку (V_{1y}, V_{2y}) выбрать на границе области Q_v , т.е. снизить скорости судов до значений $V_{1y} = 16$ узлов и $V_{2y} = 11,5$ узлов.

Результаты и их обсуждение. При использовании области опасных курсов Q_k судов для выбора маневра расхождения в стесненных условиях плавания во избежание посадки на мель необходимо учитывать имеющиеся в районе маневрирования навигационные опасности. Рассмотрим этот вопрос более подробно. Предположим, что в районе маневрирования судов находится точечная навигационная опасность, которая характеризуется параметрами: пеленгами $\alpha_{n(1,2)}$ с судов на опасность, дистанциями $D_{n(1,2)}$ до опасности и предельно – допустимой дистанцией \hat{D}_n ее прохождения. Чтобы при расхождении избежать посадки на мель, каждое из судов должно избегать курсов уклонения, заключенных между граничными значениями курсов уклонения $K_{yn}^{(p)}$ и $K_{yn}^{(s)}$, которые рассчитываются с помощью выражений:

$$K_{yn1}^{(s)} = \alpha_{n1} + \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n1}}, K_{yn1}^{(p)} = \alpha_{n1} - \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n1}},$$

$$K_{yn2}^{(s)} = \alpha_{n2} + \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n2}}, K_{yn2}^{(p)} = \alpha_{n2} - \arcsin \frac{\hat{D}_n}{D_{n2}}.$$

В качестве примера рассмотрим ситуацию опасного сближения судов при наличии точечной навигационной опасности. Параметры ситуации сближения имеют следующие значения $V_1 = 10$ уз., $V_2 = 20$ уз., $D = 3$ мили, $\alpha = 0^\circ$, $D_d = 1$ мили, $\hat{D}_n = 0,5$ мили, $\alpha_{n1} = 27^\circ$, $D_{n1} = 2,24$ мили, $\alpha_{n2} = 135^\circ$, $D_{n2} = 1,41$ мили. Ситуация отображена на рис. 3.

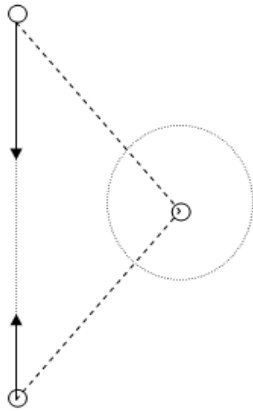


Рис. 3. Исходная ситуация опасного сближения

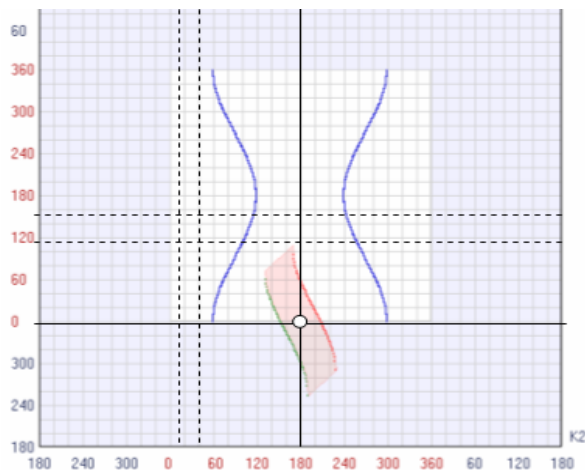


Рис. 4. Область недопустимых курсов с учетом точечной навигационной опасности

Для данной ситуации получены следующие граничные недопустимые курсы: $K_{yn1}^{(s)} = 39,9^\circ$, $K_{yn1}^{(p)} = 14,1^\circ$,

$K_{yn2}^{(s)} = 155,8^\circ$, $K_{yn2}^{(p)} = 114,2^\circ$. Область опасных курсов с учетом точечной навигационной опасности показана на рис. 4.

При следовании судов начальными курсами $K_1 = 0$ и $K_2 = 180$ соответствующая точка, как следует из рис. 4, принадлежит области опасных курсов. При выборе маневра расхождения следует избегать выбора точек, находящихся между параллельными пунктирными линиями.

Выводы

1. Рассмотрен принцип внешнего управления процессом расхождения судов и показано, что главными его достоинствами являются одинаковая интерпретация ситуации опасного сближения при выборе маневров расхождения и отсутствие система координации, регламентирующей взаимодействие опасно сближающихся судов.

2. Приведены основные методы оценки опасности сближения судов и выбора в случае необходимости маневра их расхождения. Показано, что основными методами внешнего управления процессом расхождения судов являются область опасных курсов сближающихся судов и область их опасных скоростей, причем приведены аналитические выражения их границ, что составляет научную новизну статьи.

3. Предложена процедура учета точечной навигационной опасности при выборе безопасных курсов расхождения судов с помощью области опасных курсов, позволяющая безопасно разойтись судам без угрозы посадки на мель.

4. Показана целесообразность использования рассмотренных способов в виде компьютерной информационной системы при внешнем управлении процессом расхождения судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В.В. Павлов, Н.И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. - № 68. - С. 43-45.
2. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
3. 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.
4. Кудряшов В. Е. Синтез алгоритмов безопасного управления судном при расхождении с несколькими объектами / В. Е. Кудряшов // Судостроение. – 1978. - №5. – С. 35-40.
5. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Э.Н. Пятаков, Р.Ю. Бужбецкий, И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков – Херсон: Гринь Д.С., 2015.-312 с.
6. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н.Цымбал, И.А.Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
7. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расхождений судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.15. - Одесса: "Издательство Информ", 2008. – С. 166 – 171.
8. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А. Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. Одесса: ОНМА. - С. 18 -23.
9. Вагущенко Л.Л. Расхождение с судами смещением на параллельную линию пути / Л.Л. Вагущенко. – Одесса: Фенікс, 2013. – 180 с.
10. Булгаков А.Ю. Использование опасной области курсов двух судов для выбора допустимого маневра расхождения/ А.Ю. Булгаков// Водный транспорт. – 2014. №2 (20).– С. 12 – 17.
11. 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. Pavlov V.V. Some questions of choice of maneuver in the situations of divergence of vessels/ Pavlov V.V., Senshin N.I. // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. - 1985.- №68. - p. 43 - 45.
2. Kulikov A.M. Optimum management by divergence of vessels / Kulikov A.M., and Poddubnyy V.V.// Sudostroenie. -1984.- №12.- p. 22 - 24.

4. Kudryashov V.E. Synthesis of algorithms of safe management by a ship at divergence with a few objects/Kudryashov V.E. //Sudostroenie .- 1978.- №5.- p. 35 - 40.
5. Pyatakov E.N. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E.N., Buzhbeckij R.Y., Burmaka I.A., Bulgakov A. Y. - Kherson: Grin D. S.- 2015.- 312 p.
6. Tsimbal N.N. Flexible strategies of divergence of vessels/ Tsimbal N.N., Burmaka I.A. and Tyupikov E.E. - Odessa: KP OGT.- 2007.- 424 p.
7. Pyatakov E. N. Estimation of efficiency of pair strategies of going away vessels / Pyatakov E. N., Zaichko S.I.// Sudovozhdenie.- 2008.- №15 .- p. 166 – 171.
8. Burmaka I.A. Maneuver of divergence of three vessels by the change of courses/ Burmaka I.A., Bulgakov A. Y.// Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2014.- №20 . - p. 18 - 23.
9. Vagushchenko L.L. Divergence with vessels by displacement on the parallel line of way / Vagushchenko L.L.- Odessa: Feniks.- 2013.- 180 p.
10. Bulgakov A.Y. Use of dangerous region of courses of two vessels for the choice of possible manoeuvre of divergence/ Bulgakov A.Y.// Vodnyy transport.- 2014.- №2 (20).- p. 12 – 17.
11. 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.

Warning of collisions of vessels by the methods of external control of process of divergence

I. Burmaka, G. Kalynychenko, M. Kulakov

Principle of external control of process of divergence of vessels is considered and his basic dignities. It is shown that the regions of dangerous courses of the drawn together vessels and their dangerous speeds are the basic methods of external control of process of divergence of vessels, which estimation of danger of situation of rapprochement and choice of maneuver of divergence is possible by. At the choice of safe courses of divergence of vessels by the region of dangerous courses procedure of account of point navigation danger is offered.

Keywords: *safety of navigator, divergence of vessels at dangerous rapprochement, external control of process of divergence, region of dangerous courses and speeds, point navigation danger.*