

УДК 656.61.052.484

ЛОКАЛЬНО-НЕЗАВИСИМОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ

Пятаков Э. Н., к.т.н., доцент кафедры судовождения Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: burmaka-mob@ukr.net;

Омельченко Т. Ю., старший преподаватель кафедры морских перевозок Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: burmaka-mob@ukr.net;

Волков Е. Л., аспирант Национального университета «Одесская морская академия», e-mail: burmaka-mob@ukr.net

Рассмотрен принцип локально-независимого управления процессом расхождения. Показано, что для безопасного расхождения судов необходима координация их маневров расхождения с помощью обобщенного бинарного координатора.

Для ситуаций сближения судна с целью предложена процедура оценки опасности сближения с помощью области недопустимых параметров движения судна. Если скорость судна больше скорости цели, то при опасном сближении с помощью упомянутой области можно выбрать маневр расхождения изменением курса судна. Показана реализация предлагаемой процедуры с помощью компьютерной программы. Приведен численный пример оценки опасности сближения судна с целью и выбора безопасного маневра расхождения изменением курса судна.

Получены аналитические выражения, с помощью которых возможен расчет моментов времени поворота судна для реализации маневра расхождения изменением курса судна, зависящие от показателей формы относительной траектории.

Ключевые слова: безопасность судовождения, процесс расхождения судов, локально-независимое управление, система бинарной координации, область недопустимых параметров, оценки опасности сближения, расхождение изменением курса, аналитические выражения расчета параметров стратегии расхождения.

Постановка проблемы. При опасном сближении судов, когда дистанция кратчайшего сближения меньше предельно-допустимой дистанции, возникает необходимость выполнения маневра расхождения. Основным принципом управления процессом расхождения судов является локально-независимое управление, суть которого заключается в контроле каждым из судов текущей ситуации сближения и при возникновении ситуационного возмущения его компенсация производится маневрами обоих судов, причем выбор маневра расхождения производится каждым из них независимо. Для обеспечения безопасности процесса расхождения необходима согласованность маневров расхождения судов, т. е. их координация, позволяющая увеличивать дистанцию кратчайшего сближения. Высокий риск столкновения сближающихся судов в значительной мере обусловлен несовершенной процедурой выявления ситуации опасного сближения и отсутствием простого и оперативного способа принятия решения по выбору безопасного маневра расхождения в зависимости от степени угрозы столкновения. Так как маневр расхождения изменением курса судна является предпочтительным при наличии достаточного водного пространства, то следует сформировать способ выбора маневра уклонения судна для безопасного расхождения. В процессе расхождения изменением курса приращение истинного курса вызывает приращение относительного курса, которые могут иметь разные знаки, что ведет к неоднозначности расчетов параметров расхождения. Пути решения этих вопросов рассмотрены в данной статье.

Анализ последних достижений и публикаций. В работе [1] рассмотрены принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов, а также приведен анализ методов их реализации. Подробное исследование методов локально-независимого управления приведено в работе [2], а для расхождения оперирующего судна с несколькими опасными целями предложен метод формирования гибких стратегий расхождения. Вопросы учета навигационных опасностей и инерционности судна при выборе стратегии расхождения судна освещены в работах [3, 4]. Взаимодействие судов в ситуации опасного сближения и выбор стратегии

расхождения для предупреждения их столкновения рассмотрены в работе [5]. Описание процесса расхождения судов в терминах дифференциальной антагонистической игры предложено в работе [6], а в работе [7] предложена экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближении судов. Выбор оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрен в работе [8].

В работах [9, 10] отмечается, что задача выбора оптимального маневра расхождения очень сложная, так как процесс управления движением судна является многомерным с нелинейными и нестационарными характеристиками, причем задача носит игровой характер. Работы носят теоретический характер, рассматривая возможность описания процесса расхождения судов в терминах дифференциальных игр.

В работе [11] излагается понимание содержания автономной судовой системы уклонения от столкновения СА (Collision avoidance) и её теоретическое обоснование. Совместно с алгоритмом по уклонению от столкновения рассмотрены дополнительно познавательные возможности человека и Правила уклонения от столкновения COLREG. С учетом факторов, влияющих на процесс уклонения от столкновения, рассматриваются требования к автономной навигации. Эти факторы способен оценить человек и осуществить управление судном на удовлетворительном уровне, однако принятые решения являются субъективными и могут быть ошибочными, в результате чего может возникнуть столкновение. В работе указывается, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены в классической или компьютерной категориях. Классическая техника основана на математических моделях и алгоритмах. Программы основаны на использовании искусственного интеллекта AI (Artificial Intelligence). Областью AI для систем автономного уклонения от столкновения, рассматриваемых в статье, являются эволюционные алгоритмы, логика фuzzi, экспертные методы, нейросеть NN (Neural networks) и комбинация этих методов – гибридные системы (hybrid system). При теоретическом направлении работа не содержит рекомендаций практическому судоводждению.

В последнее время появились исследования по проблеме обеспечения безопасного расхождения судов методами внешнего управления с использованием недопустимых областей курсов или скоростей судов [1]. Предлагаемый подход к решению проблемы предупреждения столкновения судов целесообразно использовать и при локально-независимом управлением процессом расхождения. Этому вопросу посвящена настоящая статья.

Цель статьи. Целью настоящей статьи является рассмотрение способов оценки опасности сближения судна с целью и, в случае необходимости, выбор судном маневра расхождения изменением курса при локально-независимом управлении с помощью области недопустимых параметров движения судна.

Изложение основного материала. При локально-независимое управлении появление ситуационного возмущения ω между судами ведет к их взаимодействию Vz , в результате которого программный участок относительного движения с ситуационным возмущением заменяется относительной траекторией без ситуационного возмущения маневром расхождения $M = (m_1, m_2)$ судов.

Взаимодействие судов Vz можно интерпретировать, как оператор или отображение параметров ситуации сближения во множество параметров стратегии расхождения M , причем оно состоим из оператора Crd координации маневров и оператора Ptm расчета параметров маневров и осуществляется с помощью координатора $c_0(Vz)$, входом которого является вектор ситуации сближения \bar{R} , а выходом - сигналы судам θ_1 и θ_2 , как показано на рис. 1. Сигналы θ_i содержит координирующий сигнал γ_i и сигнал связи μ_i , причем координирующие сигналы γ_i предписывают подмножество курсов уклонения каждого судна, обеспечивающих согласованность маневров расхождения, а сигналы связи μ_i

содержат информацию каждому судну о прогнозируемом поведении другого судна. При этом, $\mu_1 = \gamma_2$ и $\mu_2 = \gamma_1$.

Каждый из координирующих сигналов γ_i содержит три составляющие: о наличии приоритета, предписываемого координатором, и сигналы, регламентирующие взаимодействующим судам возможность уклонения вправо и влево.

Исходя из сигнала θ_i и вектора \bar{R} , каждое из взаимодействующих судов c_i производит выбор маневра расхождения m_i из допустимого подмножества курсов уклонения, которое регламентируется координирующим сигналом γ_i .

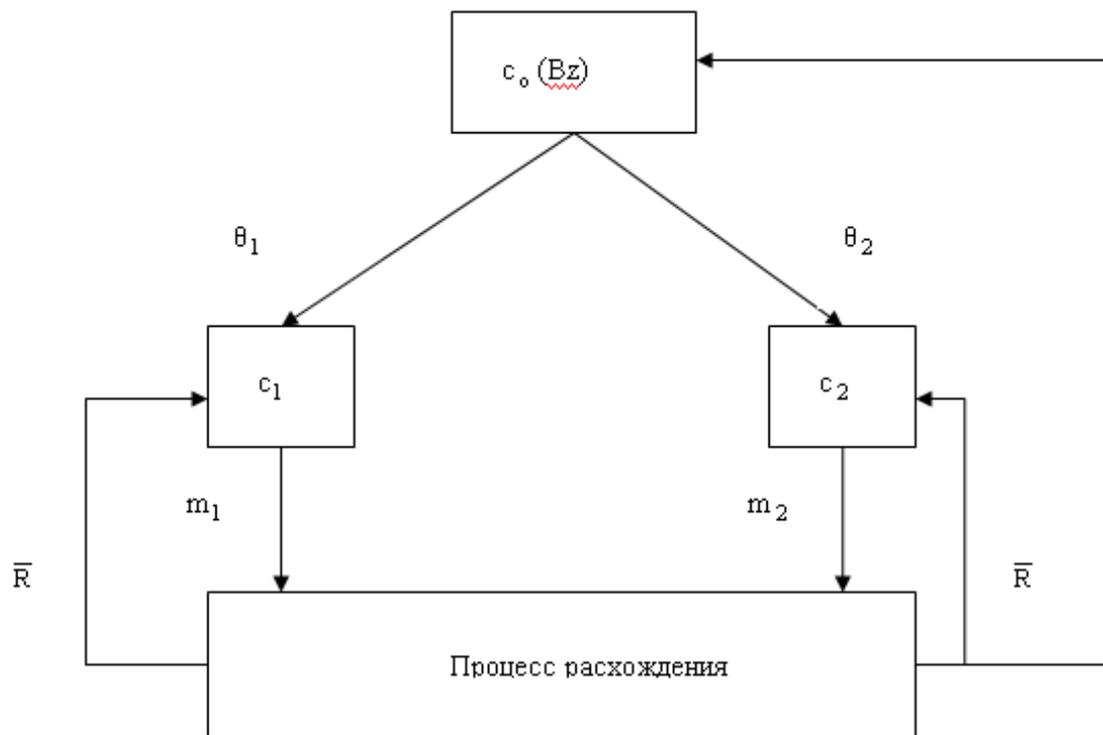


Рисунок 1 – Принцип локально-независимого управления процессом расхождения

По определению сближение является опасным, если при сближении судна с целью дистанция кратчайшего сближения $\min D$ меньше предельно-допустимой дистанции d_d . Так как значение $\min D$ зависит от пеленга на цель α и дистанции D между судном и целью, а также от параметров движения судна (курса K_1 , скорости V_1) и цели K_2 , V_2 [5], то при заданных значениях α , D , K_2 и V_2 существует множество сочетаний параметров движения судна K_1 и V_1 , при которых имеет место неравенство $\min D \leq d_d$. Если сочетания K_1 и V_1 рассматривать, как точки (K_1, V_1) координатной плоскости $K_1 \times V_1$, то область Ω_d , для каждой точки (K_1, V_1) которой выполняется неравенство $\min D \leq d_d$, будем называть областью недопустимых параметров движения судна.

Очевидно, границей области Ω_d является совокупность точек (K_1, V_1) , для каждой из которой достигается равенство $\min D = d_d$. Учитывая, что данное равенство достигается при относительном уклонении судна как вправо так и влево относительно направления пеленга, то имеется две границы, которые ограничивают область недопустимых параметров движения судна Ω_d . В этом случае если точка (K_{1i}, V_{1i}) принадлежит области Ω_d , то сближение судна с целью является опасным, так как $\min D < d_d$. В противном случае при сближении опасность столкновения не возникает. Найдем аналитическое выражение для

границ области Ω_d . Для этого в равенство $\min D = d_d$ следует подставить выражение для $\min D$ [5]:

$$\Delta D \sin(\alpha - K_{ot}) = d_d,$$

где K_{ot} – относительный курс; Δ – относительное уклонение, знак которого обеспечивает положительное значение $\min D$.

Очевидно:

$$K_{ot} = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}. \quad (1)$$

Обозначим $\gamma = \alpha - \arcsin \frac{d_d}{\Delta D}$. В зависимости от знака $\Delta(\pm)$ получим:

$$\gamma^{(1,2)} = \alpha \mp \arcsin \frac{d_d}{D}.$$

Из выражения (1) следует:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \operatorname{tg} \gamma^{(1,2)},$$

или в развернутом виде [2]:

$$\operatorname{tg} K_{ot} = \frac{V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2}{V_1 \cos K_1 - V_2 \cos K_2} = \frac{\sin \gamma^{(1,2)}}{\cos \gamma^{(1,2)}}.$$

Из полученного выражения несложно получить уравнения границ области Ω_d , связующих курс судна K_1 с его скоростью V_1 , при которых справедливо равенство $\min D = d_d$, причем для сближения судна с целью на встречных курсах:

$$K_{11}^{(1)} = \gamma^{(1)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})}{V_1}, \quad (2)$$

$$K_{11}^{(2)} = \gamma^{(2)} + \arcsin \frac{V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})}{V_1}, \quad (3)$$

при этом необходимо учитывать ограничения на значения скорости судна V_1 . Так при расчете границы (2) $V_1 \geq V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(1)})$, а в случае расчета границы (3) $V_1 \geq V_2 \sin(K_2 - \gamma^{(2)})$.

С помощью области недопустимых параметров движения судна Ω_d можно оценить, является ли опасным сближение судна с целью. Для этого достаточно проверить принадлежность точки с параметрами движения судна (K_1, V_1) области Ω_d . Если $(K_1, V_1) \in \Omega_d$, то сближение является опасным, в противном случае судно и цель сближаются безопасно. В случае опасного сближения с помощью области Ω_d можно выбрать маневр расхождения изменением курса судна при неизменной его скорости. Такому маневру соответствует точка (K_{1y}, V_1) , находящаяся на границе области Ω_d . В качестве примера на рис. 2 приведена область недопустимых параметров движения судна Ω_d для ситуации сближения судов на встречных курсах для следующих значений параметров ситуации сближения: $\alpha = 140^\circ$; $D = 4$ мили; $d_d = 1$ мили; $K_1 = 100^\circ$; $V_1 = 15$ узлов; $K_2 = 350^\circ$; $V_2 = 20$ узлов.

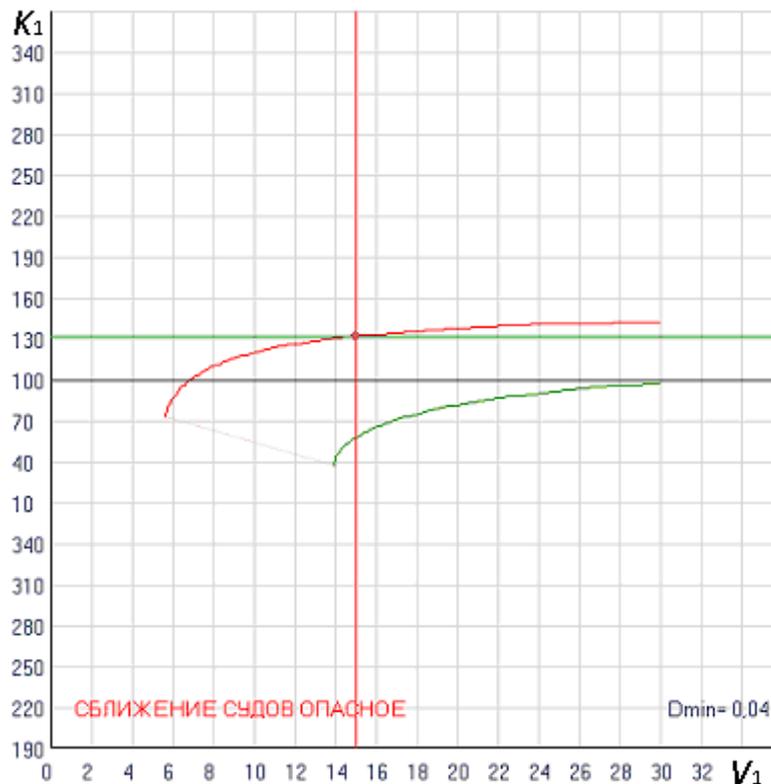


Рисунок 2 – Область недопустимых параметров движения судна Ω_d

Из рис. 2 видно, что сближение судна с целью является опасным так как точка (K_1, V_1) , соответствующая параметрам движения судна, принадлежит области их недопустимых значений Ω_d , причем $\min D = 0,04$ мили. Следовательно, для предупреждения столкновения следует предпринять маневр расхождения, для чего необходимо выбрать курса уклонения K_{1y} , соответствующий точке пересечения вертикальной линии $V_1=15$ узлов с границей области Ω_d . На рис. 2 показан курс уклонения судна $K_{1y} = 132^\circ$ отворотом вправо, обеспечивающим $\min D = 1,00$ мили.

Маневр расхождения изменением курса помимо курса уклонения K_{1y} содержит еще два параметра: момент времени начала уклонения t_y , т. е. поворота судна на курс уклонения и момент времени t_{b*} поворота судна в сторону его программной траектории движения. Для определения времени уклонения t_y приведем рис. 3, из которого следует:

$$t_y = \frac{OM}{V_{otn}},$$

где V_{otn} – начальная относительная скорость.

Искомое значение OM определяется из выражения:

$$OM = \frac{x}{\sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})},$$

где K_{otn} – начальный относительный курс.

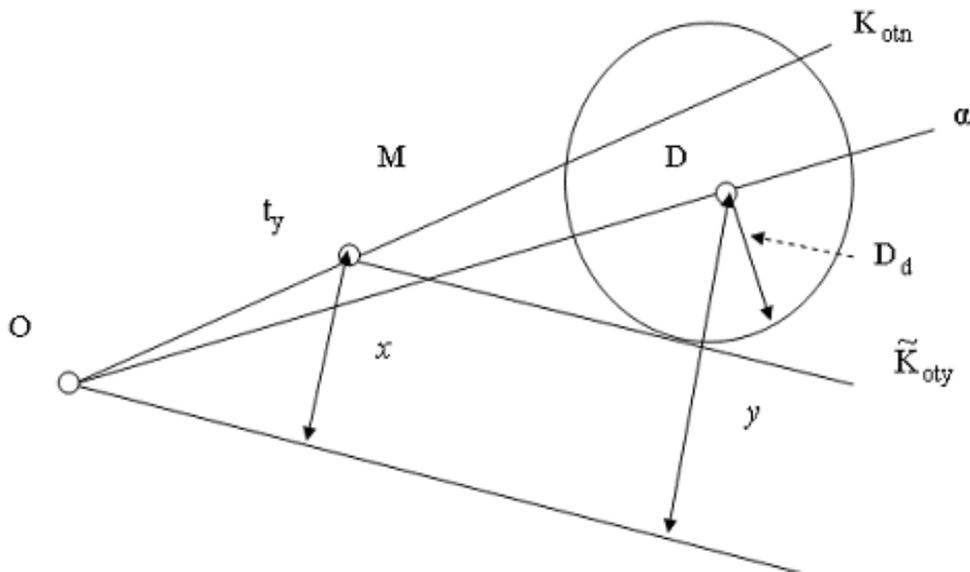


Рисунок 3 – Определение значения t_y

В свою очередь,

$$x = y - D_d \text{ и } y = \Delta_y D \sin(\tilde{K}_{oty} - \alpha),$$

где $\Delta_y = \text{sign}[\sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otn})] = \pm 1$.

Поэтому:

$$t_y = \frac{\Delta_y D \sin(\tilde{K}_{oty} - \alpha) - D_d}{\Delta_y V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})}. \quad (4)$$

Рассмотрим процедуру расчета момента времени t_{b*} поворота судна в сторону его программной траектории движения. Условием безопасного расхождения на участке выхода является равенство дистанции кратчайшего сближения $D_{\min 2}$ и предельно-допустимой дистанции D_d , т. е. $D_{\min 2} = D_d$, как показано на рис. 4. Из рис. 4 для форм относительной траектории расхождения, характеризующихся разными знаками относительных уклонений Δ_y и $\Delta_b = \text{sign}[\sin(K_{otb} - K_{oty})]$, получено выражение для момента времени t_{b*} поворота к заданной траектории движения [2]:

$$t_{b*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otb})}, \quad (5)$$

где V_{oty} – относительная скорость на участке выхода.

Если формы относительных траекторий расхождения характеризуются относительными уклонениями с одинаковыми знаками ($\Delta_y \Delta_b = 1$), то расчет величины t_{b*} производится другим способом. Для получения требуемого аналитического выражения обращаемся к рис. 5.

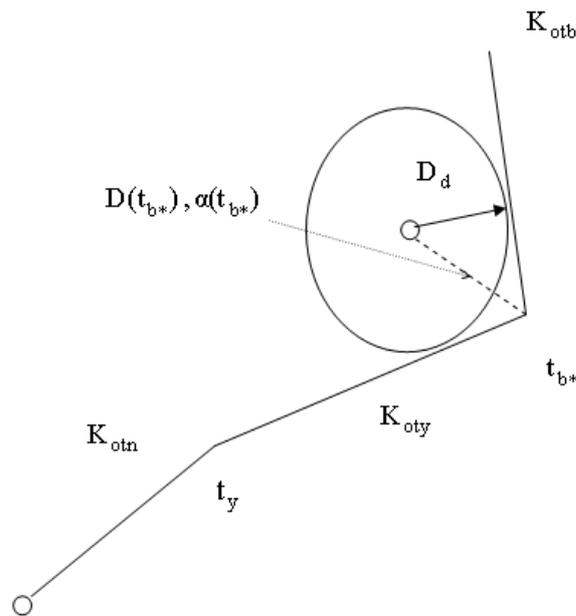


Рисунок 4 – Определение момента времени t_{b*} для относительных уклонений с разными знаками

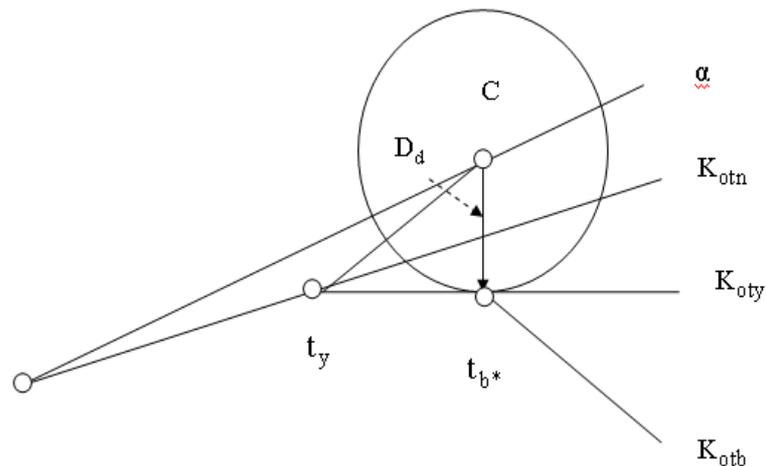


Рисунок 5 – Определение t_{b*} для относительных уклонений с одинаковыми знаками

Из рисунка следует:

$$t_{b*} = t_y + \frac{D_y \cos(K_{oty} - \alpha_y)}{V_{oty}}, \quad (6)$$

где α_y и D_y – соответственно пеленг и дистанция до цели в момент времени t_y .

Таким образом, для расчета параметров стратегии расхождения, как следует из выражений (4)–(6), следует учитывать значения относительных уклонений Δ_y и Δ_b относительной траектории расхождения.

Выводы.

1. Рассмотрен принцип локально-независимого управления процессом расхождения и приведена формализация взаимодействия судов при возникновении ситуационного возмущения.

2. Получены аналитические выражения формализации области недопустимых параметров движения судна, с помощью которой возможна оценка опасности сближения

судна с целью и выбор маневра расхождения изменением курса судна в ситуации, когда скорость судна больше скорости цели.

3. Получены аналитические выражения для расчета моментов времени поворота судна при расхождении, которые зависят от показателей формы относительной траектории.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.

2. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. – Одесса : КП ОГТ, 2007. – 424 с.

3. Петриченко Е. А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Е. А. Петриченко // Судовождение. – 2003. – №.6. – С. 103–107.

4. Бурмака И. А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / И. А. Бурмака // Судовождение. – 2005. – № 10. – С. 21–25.

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. 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.

7. Бурмака И. А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / И. А. Бурмака, А. И. Бурмака, Р. Ю. Бужбецкий – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.

8. Сафин И. В. Выбор оптимального маневра расхождения / И. В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. – 2002. – №7. – С. 115–120.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

REFERENCES

1. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.– LAP LAMBERT Academic Publishing, – Saarbryukken (Germany), – 2016. – 585 p.

2. Tsymbal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsymbal, I. Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.

3. Petrichenko E.A. Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers/ Petrichenko E.A. // Sudovozhdenie. – 2003.– №6.– p. 103–107.

4. Burmaka Y.A. Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics / Burmaka Y.A.// Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. – 2005.– № 10. – P. 21 – 25.

5. 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.

6. 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.
7. Burmaka I. Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels / Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 p.
8. Safin I.V. Choice of optimum maneuver of divergence / I.V. Safin // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. – 2002.– №7 . – p. 115 –120.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

Пятаков Е. М., Омельченко Т. Ю., Волков Є. Л. ЛОКАЛЬНО НЕЗАЛЕЖНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ РОЗХОДЖЕННЯ СУДЕН

Розглянуто принцип локально незалежного управління процесом розходження. Показано, що для безпечного розходження суден необхідна координація їх маневрів розходження за допомогою узагальненого бінарного координатора.

Для ситуацій зближення судна з ціллю запропонована процедура оцінки небезпеки зближення за допомогою області неприпустимих параметрів руху судна. Якщо швидкість судна більше швидкості цілі, то при небезпечному зближенні за допомогою згаданої області можна вибрати маневр розходження зміною курсу судна. Показана реалізація запропонованої процедури за допомогою комп'ютерної програми. Приведено чисельний приклад оцінки небезпеки зближення судна з ціллю і вибору безпечного маневру розходження зміною курсу судна.

Одержані аналітичні вирази, за допомогою яких можливий розрахунок моментів часу повороту судна для реалізації маневру розходження зміною курсу судна, залежні від показників форми відносної траєкторії.

Ключові слова: безпека судноводіння, процес розходження суден, локально незалежне управління, система бінарної координації, область неприпустимих параметрів, оцінки небезпеки зближення, розходження зміною курсу, аналітичні вирази розрахунку параметрів стратегії розходження.

Pyatakov E. N., Omelchenko T. Y., Volkov Y. L. LOCALLY-INDEPENDENT PROCESS CONTROL OF DIVERGENCE OF VESSELS

Principle of locally-independent process control of divergence is considered. It is shown that for safe divergence of vessels coordination of their maneuvers of divergence by the generalized binary coordinator is needed.

For the situations of rapprochement of ship with a target procedure of estimation of danger of rapprochement by the region of impermissible parameters of motion of ship is offered. If speed of ship more of speed of target, at dangerous rapprochement by the mentioned region it is possible to choose the maneuver of divergence by the change of course of ship. Realization of the offered procedure by the computer program is shown. The numeral example of estimation of danger of rapprochement of ship is resulted with a target and choice of safe maneuver of divergence by the change of course of ship.

Analytical expressions are got, which the calculation of moments of time of turn of ship for realization of maneuver of divergence by the change of course of ship is possible by, depending on the indexes of form of relative trajectory.

Keywords: safety of navigation, process of divergence of vessels, locally-independent management, system of binary coordination, region of impermissible parameters, estimation of danger of rapprochement, divergence by the change of course, analytical expressions of calculation of parameters of strategy of divergence.

© Пятаков Е. М., Омельченко Т. Ю., Волков Є. Л.

Статтю прийнято
до редакції 04.12.17