

Выбор стратегии расхождения при локально-независимом управлении судов в ситуации опасного сближения

Э. Н. Пятаков, С. С. Пасечнюк, Т. Ю. Омельченко

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина

Paper received 20.06.17; Accepted for publication 28.06.17.

Аннотация. Рассмотрен принцип локально-независимого управления процессом расхождения. Показано, что для безопасного расхождения судов необходима координация их маневров расхождения с помощью обобщенного бинарного координатора, которым является МППСС-72. Предложен способ синтеза полной стратегии расхождения оперирующего судна, которая предусматривает наличие второй цели в ситуации опасного сближения и учитывает возможные варианты развития ситуации сближения и требования системы бинарной координации.

Ключевые слова: безопасность судоходства, процесс расхождения судов, локально-независимое управление, система бинарной координации.

Введение. При опасном сближении судов, когда дистанция кратчайшего сближения меньше предельно-допустимой дистанции, возникает ситуационное возмущение, которое компенсируется маневром расхождения. Основным принципом управления процессом расхождения судов является локально-независимое управление, суть которого заключается в контроле каждым из судов текущей ситуации сближения и при наличии 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. Поэтому для выбора стратегии расхождения каждое из судов должно учитывать требования системы координации, которая в настоящее время реализована в МППСС-72.

Краткий обзор публикаций по теме. 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 сближения судов. Выбор оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрен в работе [8].

Анализируемые работы вносят значительный вклад в теорию решения проблемы предупреждения столкновений судов, однако при формировании стратегии расхождения они не предусматривают различные варианты протекания процесса сближения и расхождения судов, что снижает эффективность стратегий рас-

хождения, которые формируются рекомендуемыми методами.

Цель. Целью настоящей статьи является формирование стратегии расхождения судна при локально-независимом управлении с учетом возможных вариантов развития процесса сближения с целью и требований системы бинарной координации.

Материалы и методы. При локально-независимом управлении при появлении ситуационного возмущения ω между судами возникает взаимодействие Bz , в результате которого программный участок относительного движения с ситуационным возмущением трансформируется в относительную траекторию без ситуационного возмущения. Оно прогнозирует поведение сближающихся судов в процессе расхождения и предполагает формирование согласованных маневров m_1 и m_2 каждому из взаимодействующих судов, которые обеспечивает увеличение дистанции кратчайшего сближения между судами до величины $D_{\min y}$, превосходящую предельно-допустимую дистанцию D_d , т. е. $D_{\min y} \geq D_d$. При этом стратегия M может содержать маневр расхождения как одного, так и обоих судов. Взаимодействие Bz может быть формализовано следующим образом:

$$M = Bz(\bar{R}),$$

где $\bar{R} = (\alpha, D, V_1, K_1, V_2, K_2)$ - вектор начальной ситуации сближения, который характеризуется соответственно пеленгом, дистанцией между судами, а также параметрами движения судов;

$M = (m_1, m_2)$ - стратегия расхождения.

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

щих 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 .

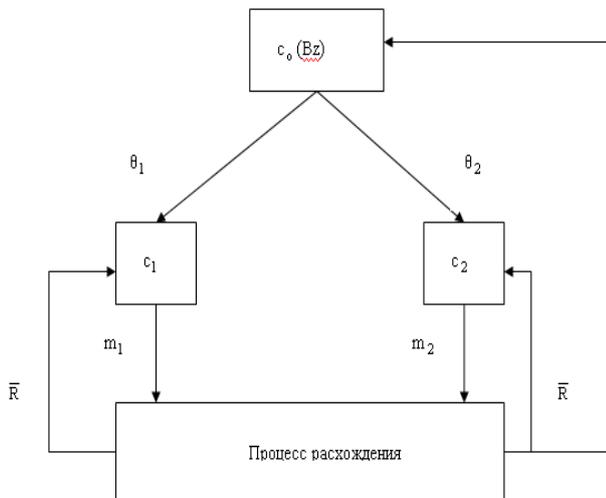


Рис. 1. Принцип локально-независимого управления процессом расхождения

Результаты и их обсуждение. Рассмотрим ситуацию опасного сближения оперирующего судна c_1 с целью c_2 при наличии в районе плавания третьего судна c_3 . Степень опасности ситуации сближения характеризуется матрицей ситуационного возмущения $W = \{\omega_{ij}\}$ [1], которая имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & \omega_{12} & \omega_{13} \\ \omega_{21} & 0 & \omega_{23} \\ \omega_{32} & \omega_{31} & 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где ω_{ij} - ситуационное возмущение, которое характеризует уровень опасности столкновения пары судов c_i и c_j .

Так как по условию начальной ситуации суда c_1 и c_2 сближаются опасно, т. е. $D_{\min 12} \leq D_d$, то значения ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{21} не равны нулю. Следовательно, между этими судами возникает взаимодействие, которое предписывается бинарным координатором $c_0(Bz)$, (МППСС-72 в части маневрирования судов при расхождении), и суда предпринимают согласованный маневр расхождения, обеспе-

чивающий обращение значений ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{21} в нуль.

При этом координатор $c_0(Bz)$, исходя из относительной позиции судов c_1 и c_2 и их статусов St_1 и St_2 , предписывает взаимодействующим судам координирующие сигналы γ_{12} и γ_{21} . Эти сигналы определяют их поведение в процессе расхождения, предписывая каждому из них взаимные обязанности, что позволяет судам произвести выбор стратегии расхождения, при реализации которой одно из судов сохраняет свои параметры движения, в то время как второе судно выполняет маневр расхождения или оба судна предпринимают согласованные маневры расхождения.

Так как в районе предполагаемого маневрирования находится судно c_3 , то, как видно из матрицы ситуационного возмущения $W(1)$, возникают ситуационные возмущения $\omega_{13} = \omega_{31}$ и $\omega_{23} = \omega_{32}$. Следовательно, обобщенный координатор $c_0(Bz)$ в рассматриваемой ситуации сближения помимо γ_{12} и γ_{21} формирует также координирующие сигналы γ_{13} , γ_{31} , γ_{23} и γ_{32} , значения которых определяют структуру полной стратегии расхождения оперирующего судна c_1 . Под полной стратегией подразумевается совокупность возможных альтернативных частных маневров уклонения судна c_1 в зависимости от значений реализовавшихся сигналов координации γ_{ij} и текущего развития ситуации сближения. Если значение ситуационного возмущения ω_{13} отлично от нуля, то судну c_1 от координатора $c_0(Bz)$ адресуются сигналы координации γ_{12} и γ_{13} , которые могут предписывать ему один тип маневра ($\gamma_{12} = 1, \gamma_{13} = 1$ или $\gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0$), т. е. уклоняться или сохранять неизменные параметры движения, или же они могут противоречить друг другу ($\gamma_{12} = 1, \gamma_{13} = 0$ или $\gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 1$), т. е. одновременно одному из судов уступать дорогу, а относительно другого сохранять неизменными курс и скорость.

Если реализуются согласованные координирующие сигналы $\gamma_{12} = 1$ и $\gamma_{13} = 1$, то оперирующее судно c_1 должно уступить дорогу судам c_2 и c_3 маневром расхождения, который может реализоваться либо общим маневром для обоих судов, или двумя последовательными маневрами для каждого из них.

При координирующих сигналах $\gamma_{12} = 0$ и $\gamma_{13} = 0$, которые предписывают оперирующему судну сохранять неизменными курс и скорость относительно обоих судов c_2 и c_3 , оперирующее судно выполняет данное требование при условии, что обе цели выполняются предписанные маневры уклонения. Если же хотя

бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, то оно следует постоянным курсом и скоростью до некоторого момента времени, после которого вынуждено собственным маневром предотвратить возможное столкновение. Если же координирующие сигналы противоречат друг другу, то оперирующее судно предпринимает маневр расхождения в нулевой момент времени, который является безопасным для обеих судов c_2 и c_3 . В процессе формирования полной стратегии расхождения оперирующее судно учитывает значение ситуационного возмущения ω_{23} и при отличии его от нуля - также и координирующие сигналы γ_{23} и γ_{32} .

В качестве примера рассмотрим формирование полной стратегии расхождения оперирующим судном в случае начальной ситуации сближения, которая характеризуется следующими переменными: параметрами движения оперирующего судна c_1 - $K_1 = 244^\circ$, $V_1 = 20$ узлов, цели c_2 - $K_2 = 52^\circ$, $V_2 = 18$ узлов, цели c_3 - $K_3 = 332^\circ$, $V_3 = 27$ узлов; относительной позицией $\alpha_{12} = 238^\circ$, $d_{12} = 5$ миль, $\alpha_{13} = 176^\circ$, $d_{13} = 4,76$ мили, $\alpha_{23} = 115^\circ$, $d_{23} = 5,0$ миль. Начальная ситуация сближения судов c_1 , c_2 и c_3 показана на рис. 2.

По исходным данным были рассчитаны дистанции кратчайшего сближения судов: $D_{\min 12} = 0,0$ мили, $D_{\min 13} = 0,0$ мили, $D_{\min 23} = 0,9$ мили. Так как все три сближающиеся судна являются судами с механическим двигателем, то имеют одинаковый статус. Координатор с учетом их относительного положения формирует координирующие сигналы $\gamma_{12} = 0$, $\gamma_{21} = 1$, $\gamma_{13} = 0$, $\gamma_{31} = 1$, $\gamma_{23} = 1$ и $\gamma_{32} = 0$.

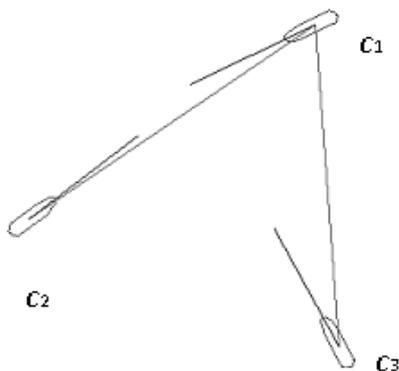


Рис. 2. Начальная ситуация сближения судов

В данном примере координирующие сигналы $\gamma_{12} = 0$ и $\gamma_{13} = 0$ являются согласованными, следовательно, если суда c_2 и c_3 выполняют предписанные координатором маневры уклонения $D_2(1)$ и $D_3(1)$, то оперирующее судно c_1 должно сохранять неизменные параметры движения, реализуя стратегию $D_1(0)$. Когда хотя бы одна из целей не уступает

дорогу оперирующему судну, то оно следует постоянным курсом и скоростью $D_1(0)$ до момента времени \tilde{t} , после чего собственным маневром расхождения $\tilde{D}_1(\tilde{t})$ предотвращает возможное столкновение. В данном примере момент времени \tilde{t} определяется уменьшением дистанций d_{12} и d_{13} до значений $d_{12} = 3,4$ мили и $d_{13} = 2,9$ мили. В этот момент времени оперирующее судно c_1 реализует частную стратегию $\tilde{D}_1(\tilde{t})$, которая заключается в уклонении c_1 на курс $K_{1,y} = 286^\circ$, в результате чего оно безопасно расходится с целями c_2 и c_3 на расстояниях $D_{\min 12} = 1,7$ мили и $D_{\min 13} = 1,0$ мили.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, в рассмотренной начальной ситуации сближения полную стратегию D_1 оперирующего судна можно записать следующим образом:

$$D_1 = \begin{cases} D_1(0), & \text{если } \gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0, D_2(1), D_3(1); \\ D_1(0), & \text{если } \gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0, D_2(0), D_3(0), t \leq \tilde{t}; \\ \tilde{D}_1(\tilde{t}), & \text{если } \gamma_{12} = 0, \gamma_{13} = 0, D_2(0), D_3(0), t > \tilde{t}. \end{cases}$$

Обращаем внимание на следующее обстоятельство: если две первые частные стратегии не предусматривают маневрирования оперирующего судна, то реализации частной стратегии $\tilde{D}_1(\tilde{t})$ требует вначале уклонения судна c_1 с программной траектории движения, а после безопасного расхождения, - его возвращения к начальному режиму движения.

Таким образом, преимуществом полной стратегии оперирующего судна является учет возможного изменения процесса сближения с целями и предварительного сформированные частные маневры уклонения, предусматривающие различные исходы меняющейся ситуации сближения, множество которых зависит от действующей системы бинарной координации.

Выводы

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

2. Показано, что для безопасного расхождения судов необходима координация их маневров расхождения с помощью обобщенного бинарного координатора, которым является МППСС-72. Координатор анализирует ситуацию опасного сближения и формирует сигналы координации взаимодействующим судам, на основании которых происходит выбор согласованных маневров расхождения.

3. Предложен способ синтеза полной стратегии расхождения оперирующего судна, которая предусматривает наличие второй цели в ситуации опасного сближения и учитывает возможные варианты развития ситуации сближения и требования системы бинарной координации, что составляет научную новизну статьи. Приведен пример формирования полной стратегии расхождения.

ЛИТЕРАТУРА

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 / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №6. – С. 103 - 107.
4. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
5. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – 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 / Бурмака И.А., Бурмака А.И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
8. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / И.В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.

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.
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.

Choice of strategy of divergence at the locally-independent management of vessels in the situation of dangerous rapprochement

E. N. Pyatakov, S. S. Pasechnyuk, T. Y. Omelchenko

Abstract. 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 which CollReg is needed. The method of synthesis of complete strategy of divergence of operating ship, which foresees the presence of the second target the situation of dangerous rapprochement and takes into account the possible variants of development of situation of rapprochement and requirement of the system of binary coordination, is offered.

Keywords: safety of navigator, process of divergence of vessels, locally-independent management, system of binary coordination.