

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛНОЙ СТРАТЕГИИ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ

В районах интенсивного судоходства зачастую возникает ситуация опасного сближения трех судов, которая не координируется существующими МППСС-72. Поэтому актуальным является разработка рекомендаций при опасном сближении трех целей с учетом требований системы бинарной координации и применения методов формирования гибких стратегий расхождения.

В работе [1] исследуются вопросы предупреждения столкновений судов с помощью гибких стратегий расхождения, а в работе [2] рассмотрены вопросы эффективности парных маневров расхождения.

Целью публикации является разработка процедуры формирования полной стратегии расхождения оперирующего судна в ситуации сближения трех судов с учетом требований существующей системы бинарной координации и особенностей отображения истинных траекторий расхождения в относительные.

В данной публикации исследуется ситуация опасного сближения оперирующего судна c_1 с целью c_2 при наличии в районе плавания третьего судна c_3 . Ситуация сближения упомянутых трех судов характеризуется матрицами пеленгов $A = \{\alpha_{ij}\}$ и расстояний $D = \{d_{ij}\}$, а также векторами скоростей $V = \{V_i\}$ и курсов $K = \{K_i\}$, с помощью которых определяются параметры относительного движения пар судов, выраженные матрицами относительных курсов $K_{ot} = \{K_{otij}\}$ и скоростей $V_{ot} = \{V_{otij}\}$.

Степень опасности ситуации сближения характеризуется матрицей ситуационного возмущения $W = \{\omega_{ij}\}$ [1], для оценки которой необходимо воспользоваться матрицами пеленгов $A = \{\alpha_{ij}\}$, расстояний $D = \{d_{ij}\}$ и относительных курсов $K_{ot} = \{K_{otij}\}$. Матрица ситуационного возмущения имеет вид [1]:

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

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

Ситуационное возмущение ω_{ij} возникает при прогнозируемом падании судов в область недопустимых позиций и оно выявляет грядущую опасную позицию заблаговременно, исходя из прогноза изменения относительной позиции пары судов. Следовательно, ситуационное возмущение возникает тогда, когда прогнозируемое значение дистанции кратчайшего сближения $D_{\min ij}$ меньше значения предельно-допустимой дистанции сближения D_d . В первом приближении, с учетом требований МППСС-72, ситуационное возмущение ω_{ij} при стандартных ситуациях опасного сближения, исключая экстренное расхождение, может принимать значения [3]:

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0, & D_{\min ij} > D_d, S_{ij} \in S_0; \\ 1, & D_{\min ij} \leq D_d, S_{ij} \in S_1; \\ 2, & D_{\min ij} \leq D_d, S_{ij} \in S_2, \end{cases} \quad (2)$$

где S_{ij} – начальная ситуация сближения i -го и j -го судов; S_0 – подмножество безопасных ситуаций; S_1 и S_2 – подмножества ситуаций соответственно с первой и второй областями взаимных обязанностей (правило 17 МППСС-72).

Дистанция кратчайшего сближения $D_{\min ij}$ определяется из формулы [4]:

$$D_{\min ij} = \text{Abs}[d_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{outj})].$$

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 $Coor_{(2)}$ (МППСС-72 в части маневрирования судов при расхождении) и суда предпринимают согласованный маневр расхождения, обеспечивающий обращение значений ситуационных возмущений ω_{12} и ω_{21} в нуль.

При этом координатор $Coor_{(2)}$, исходя из относительной позиции судов S_{12} и их статусов St_1 и St_2 , предписывает взаимодействующим судам координирующие сигналы γ_{12} и γ_{21} [3, 4]. Эти сигналы опре-

деляют их поведение в процессе расхождения, предписывая каждому из них взаимные обязанности, что позволяет судам выбрать 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 $\omega_{23} = \omega_{32}$, которые в общем случае, согласно (2), могут принимать значения от 0 до 2. Следовательно, обобщенный координатор $Coor_{(2)}$ 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 $Coor_{(2)}$ 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, также 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.

В случае согласованных координирующих сигналов $\gamma_{12} = 1$ и $\gamma_{13} = 1$ оперирующее судно c_1 должно уступить дорогу судам c_2 и c_3 маневром расхождения, который может реализоваться либо общим маневром для обоих судов c_2 и c_3 , или двумя последовательными маневрами для каждого из них.

Если координирующие сигналы $\gamma_{12} = 0$ и $\gamma_{13} = 0$ предписывают оперирующему судну сохранять неизменными курс и скорость относительно обоих судов c_2 и c_3 , то оперирующее судно выполняет данное требование при условии, что цели c_2 и c_3 выполняют предписан-

ные маневры уклонения. Если же хотя бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, то последнее следует постоянным курсом и скоростью до некоторого момента времени, после которого оно вынуждено собственным маневром предупредить возможное столкновение. Если 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 . При формировании полной стратегии оперирующим судном учитывается значение ситуационного возмущения ω_{23} и при отличии его от нуля – также и координирующие сигналы γ_{23} и γ_{32} .

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.

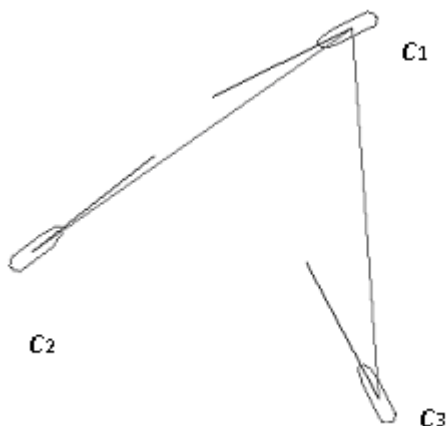


Рис. Начальная ситуация сближения судов

По исходным данным были рассчитаны дистанции кратчайшего сближения судов: $D_{\min 12} = 0$ миль, $D_{\min 13} = 0,0$ мили, $D_{\min 23} = 0,9$

мили. Все три сближающиеся судна имеют одинаковый статус, так как являются судами с механическим двигателем. С учетом их относительного положения координатором формируются следующие координирующие сигналы: $\gamma_{12} = 0$, $\gamma_{21} = 1$, $\gamma_{13} = 0$, $\gamma_{31} = 1$, $\gamma_{23} = 1$ и $\gamma_{32} = 0$.

В рассматриваемом примере координирующие сигналы $\gamma_{12} = 0$ и $\gamma_{13} = 0$ являются согласованными, поэтому если суда c_2 и c_3 выполнят предписанные координатором маневры уклонения $D_2(1)$ и $D_3(1)$, то оперирующее судно c_1 должно сохранять неизменные параметры движения, реализуя стратегию $D_1(0)$. В случае, когда хотя бы одна из целей не уступает дорогу оперирующему судну, то последнее следует постоянным курсом и скоростью $D_1(0)$ до момента времени \tilde{t} , после чего оно собственным маневром расхождения $\tilde{D}_1(\tilde{t})$ предупреждает 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 $K_{1y} = 286^\circ$, в результате чего оперирующее судно 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, в рассмотренной ситуации полная стратегия оперирующего судна:

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

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 затем, после безопасного расхождения, - его возвращения к начальному режиму движения. Таким образом, выполняя маневр расхождения, оперирующее судно вначале отклоняется от программной траектории движения, безопасно расходится с целью в заданной дистанции, а затем ложится на курс выхода на заданную траекторию. Форму истинной траектории расхождения будем характеризовать

двумя параметрами: истинным уклонением δ_y и истинным выходом δ_b , причем каждый из параметров принимает значение «1», если последующий курс больше предыдущего и «-1» в противном случае. В рассматриваемом примере $K_1 = 244^\circ$, $K_{1y} = 286^\circ$, $K_b = K_1 - 40 = 244^\circ$, следовательно, $\delta_y = 1$, $\delta_b = -1$. Однако, если маневр расхождения выполняет судно, скорость которого меньше скорости цели, то, как показано в работе [4], относительный курс может как увеличиваться, так и уменьшаться с ростом истинного курса маневрирующего судна. Поэтому форма относительной траектории может в общем случае отличаться от формы истинной траектории. Относительная траектория расхождения характеризуется относительным уклонением Δ_y и относительным выходом Δ_b , причем относительные характеристики принимают также значения «1» или «-1» в зависимости от соотношения смежных относительных курсов. Обратимся к приведенному примеру, при маневрировании оперирующего судна c_1 , с учетом неизменных параметров целей c_2 и c_3 изменяются относительные курсы K_{ot12} и K_{ot12} . Для относительных курсов судна c_1 и цели c_2 $K_{ot12o} = 238^\circ$, $K_{ot12y} = 261^\circ$, $K_{ot12b} = 217^\circ$, поэтому $\Delta_{12y} = 1$, $\Delta_{12b} = -1$. Для относительных курсов оперирующего судна c_1 и цели c_3 $K_{ot13o} = 189^\circ$, $K_{ot12y} = 199^\circ$, $K_{ot12b} = 174^\circ$, поэтому $\Delta_{13y} = 1$, $\Delta_{13b} = -1$. Обе относительные траектории расхождения имеют такую же форму, как и истинная траектория. Значения относительных характеристик Δ_y и Δ_b определяют процедуру расчета необходимых относительных курсов маневра расхождения, на основании которых рассчитываются соответствующие истинные курсы оперирующего судна. С учетом данного обстоятельства необходимо разработать способ отображения истинных траекторий расхождения в относительные траектории для расчета параметров маневра расхождения.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
2. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков., С.И. Заичко // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, – 2008. – Вып.15. - С. 166 – 171.
3. 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.
4. 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.