

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗВРАЩЕНИЯ СУДНА НА ЗАДАННУЮ ТРАЕКТОРИЮ ДВИЖЕНИЯ ПОСЛЕ РАСХОЖДЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ

Одной из наиболее актуальных в судовождении является проблема обеспечения безаварийного расхождения судов в стесненных водах, которой посвящены работы ученых разных стран мира. Многочисленные исследования, выполненные по проблеме выбора безопасного маневра расхождения опасно сближающихся судов, в подавляющем большинстве под маневром расхождения подразумевают только уклонение судна с программной траектории движения, обеспечивающей максимально безопасную дистанцию кратчайшего сближения. Дальнейшее управление судном после завершения момента кратчайшего сближения в таких работах не обсуждается, полагая, что вопрос выбора дальнейшей траектории движения судна является тривиальным. В простейшем случае, когда ситуация опасного сближения возникает в открытом море при отсутствии других судов в районе возможного столкновения, при выборе только безопасного уклонения, а не оптимального маневра расхождения, а также при сближении судов на встречных курсах, можно считать, что опасность столкновения существует только на участке уклонения.

В общем случае угроза столкновения наиболее вероятна при плавании в стесненных водах, которые характеризуются высокой плотностью интенсивности движения судов и наличием многочисленных навигационных опасностей. В таких условиях плавания выход на программную траекторию является частью стратегии безопасного расхождения судов. Более того, даже на свободной от мешающих судов и навигационных опасностей акватории при опасном сближении судов на пересекающихся курсах и обгоне, столкновения возможны, как на участке уклонения, так и на участке возвращения на программную траекторию движения.

В работах [1 - 3] впервые в стратегию расхождения помимо участка уклонения судна с заданной траектории был также включен участок возвращения на нее, а расчет параметров стратегии производился с учетом ограничений на безопасное расхождение для обоих участков.

При детальном исследовании проблемы предупреждения столкновений судов [3] было установлено, что в зависимости от начальной относительной позиции пары опасно сближающихся судов, парамет-

ров их движения и инерционных характеристик, суда могут находиться в разных по угрозе столкновения подмножествах начальных позиций, что требует применение индивидуальных стратегий расхождения. Декомпозиция множества начальных ситуаций на подмножестве P_{ni} ($i=1\dots3$) производится с помощью двух предельно допустимых дистанций l_{d1} и l_{d2} ($l_{d1} > l_{d2}$), которые рассчитываются с помощью специальной процедуры.

В случае, если судно способно разойтись с целью в дистанции не меньшей предельно допустимой дистанции l_{d1} , то реализовалось подмножество начальных позиций P_{n1} , которому соответствует первая стратегия расхождения $D_1(t_y, K_y)$. Эта стратегия заключается в том, что независимо от соотношения скоростей судов рассчитывается маневр, содержащий момент начала участка уклонения t_y и курс уклонения K_y , позволяющие судну разойтись с целью в дистанции l_{d1} .

В случае, если судно с начальной позиции при любом курсе уклонения не может обеспечить дистанцию кратчайшего сближения D_{\min} , меньшую первой предельно допустимой дистанции l_{d1} , но большую, чем величина l_{d2} , то имеет место подмножество начальных позиций P_{n2} , которому соответствует вторая стратегия расхождения $D_2(K_y = K_{extr})$, обеспечивающая наибольшую безопасность расхождения судов максимальной дистанцией кратчайшего сближения D_{\min} . Так как $\max[D_{\min}]$ достигается при экстремальном курсе K_{otextr} , то этот курс является параметром стратегии D_2 , а уклонение начинается в нулевой момент времени.

Наиболее опасная ситуация, когда судно попадает в подмножество опасных позиций P_{n3} ($\max[D_{\min}] < l_{d2}$), и возникает ситуация чрезвычайного сближения, в которой судно минимизирует относительную скорость сближения с целью, увеличивая интервал времени до позиции минимального сближения. Для этого судно ложится на курс равный обратному пеленгу на второе судно, вовлекая второе судно во взаимодействие, чтобы совместными усилиями компенсировать ситуационное возмущение. В этом заключается третья стратегия расхождения D_3 .

Если обратиться к аналитическим выражениям, то, как показано в работе [3], курс уклонения K_y при первой стратегии расхождения

$D_1(t_y, K_y)$ при скорости судна, меньшей скорости цели, определяется выражениями:

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{y(s)1} &= \tilde{K}_{oty(s)} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(s)})]; \\ \tilde{K}_{y(s)2} &= \tilde{K}_{oty(s)} + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(s)})]; \\ \tilde{K}_{y(p)1} &= \tilde{K}_{oty(p)} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(p)})]; \\ \tilde{K}_{y(p)2} &= \tilde{K}_{oty(p)} + \pi - \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(p)})],\end{aligned}$$

где $\tilde{K}_{y(s)}$ и $\tilde{K}_{y(p)}$ - курсы судна соответственно при уклонении вправо и влево; K_c - курс цели и ρ - отношение скорости судна к скорости цели.

В случае, если скорость судна превосходит скорость цели, справедливы выражения:

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{y(s)} &= \tilde{K}_{oty(s)} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(s)})]; \\ \tilde{K}_{y(p)} &= \tilde{K}_{oty(p)} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - \tilde{K}_{oty(p)})], -\end{aligned}$$

причем относительные курсы уклонения $\tilde{K}_{oty(s)}$ и $\tilde{K}_{oty(p)}$ определяются выражениями:

$$\tilde{K}_{oty(s)} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{l_{d1}}{l_y}\right), \quad \tilde{K}_{oty(p)} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{l_{d1}}{l_y}\right),$$

где l_y - дистанция между судами в момент начала уклонения.

Момент начала уклонения t_y рассчитывается исходя из заметности уклонения судна от начального курса.

Стратегия расхождения $D_2(K_y = K_{extr})$ содержит два параметра: время начала уклонения, которое равно начальному моменту времени $t_y = t_0$ и курс уклонения K_y , который обеспечивает $\max D_{\min}$. Это достигается на экстремальных относительных курсах:

$$K_{ot\min} = \pi + K_c - \arcsin \rho \quad \text{или} \quad K_{ot\max} = \pi + K_c + \arcsin \rho.$$

Если через K_{extr} обозначить экстремальный относительный курс ($K_{ot\min}$ или $K_{ot\max}$), на котором дистанция кратчайшего сближения D_{\min} максимальна, то выражение для $\max D_{\min}$ имеет следующий вид, учитывая, что уклонение судна производится в начальный момент времени:

$$\max D_{\min} = l_n |\sin(K_{extr} - \alpha_n)|,$$

где α_n - пеленг на цель в начальный момент времени. Очевидно, что при учете выражений для $K_{or\min}$ и $K_{or\max}$ справедливо соотношение $\sin(K_{extr} - \alpha_n) < 1$, следовательно, $\max D_{\min} < D_n$.

Данным экстремальным относительным курсам уклонения, как следует из [3], соответствуют истинные курсы уклонения:

$$K_{y\min} = K_c + \arccos(\rho) \quad \text{и} \quad K_{y\max} = K_c - \arccos(\rho).$$

В случае, когда начальная позиция судов принадлежит подмножеству опасных ситуаций P_{n3} и используется стратегия $D_3[K_{y1} = \alpha(t) + \pi]$, которая применяется в начальный момент времени, а текущий курс K_{y1} равен $K_{y1} = \alpha(t) + \pi$, причем он изменяется таким же образом, как и текущий пеленг $\alpha(t)$. В этом случае, учитывая, что курс цели K_c неизменный, выбор курса $K_{y1} = \alpha(t) + \pi$ ведет к минимальной опасности столкновения, так как минимизирует сокращение дистанции между судном и целью.

Возвращение судна на программную траекторию движения после расхождения с целью зависит от применяемой стратегии расхождения. Так, при использовании первой стратегии расхождения выбирается курс возвращения K_b судна на заданную траекторию, который приблизительно на 40° отличается от программного курса, причем момент поворота t_b на этот курс, обеспечивающий безопасное достижение заданной траектории, вычисляется с помощью выражения:

$$t_b = t_y + \frac{l_{d1} + l_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{om} t_y \sin(K_{otb} - K_{om})}{V_{oty} \sin(K_{oty} - K_{otb})},$$

где K_{om} , K_{oty} и K_{otb} - соответственно относительные курсы начальный, уклонения и возвращения; V_{om} и V_{oty} - относительные скорости соответственно начальная и уклонения.

В случае расхождения судна с целью с помощью второй стратегии, после момента кратчайшего сближения на дистанцию $\max D_{\min}$ судно продолжает следовать экстремальным курсом $K_y = K_c \pm \arccos(\rho)$, увеличивая дистанцию до цели, пока не наступит момент времени:

$$t_b^* = t_y + \frac{l_{d1} + l_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{om} t_y \sin(K_{otb} - K_{om})}{V_{oty} \sin(K_{extr} - K_{otb})}.$$

В этот момент времени судно ложится на курс возвращения K_b на программную траекторию движения.

Если для расхождения судов реализуется третья стратегия расхождения, то судно уходит от цели на курсе равном обратному пеленгу на цель, увеличивая дистанцию до цели, пока дистанция D между судном и целью не станет равной l_{d2} . В этом случае расходящиеся суда попадают из третьего подмножества относительных позиций P_{n3} во второе P_{n2} , в котором оптимальной является вторая стратегия $D_2(K_y = K_{extr})$. Поэтому в момент времени, когда $D = l_{d2}$, судно следует изменить свой курс на экстремальный $K_y = K_c \pm \arccos(\rho)$ и следовать им, пока не станет справедливым равенство $D = l_{d1}$, после чего надлежит сделать расчет текущего значения пеленга на цель и рассчитать по вышеприведенной формуле момент времени t_b^* поворота на курс возвращения K_b .

Максимальная безопасность возвращения судна на программную траекторию предлагаемым способом очевидна, однако она и наиболее экономична, особенно при реализации третьей стратегии расхождения, при которой скорость изменения дистанции между судном и целью является минимальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафин И.В. Расчет граничных значений параметров множества допустимых маневров расхождения // Судовождение. - 2002. - №4. - С. 95 – 100.
2. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения // Судовождение. - 2002. - №4. - С. 32 – 36.
3. Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. Гибкие стратегии расхождения судов. – Одесса: Издательство КП ОГТ, 2007. – 422 с.