

СТРАТЕГИЯ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ В СИТУАЦИИ ЧРЕЗМЕРНОГО СБЛИЖЕНИЯ

THE STRATEGY OF MANEUVERING OF SHIPS IN A SITUATION OF EXCESSIVE PROXIMITY

Рассмотрена стратегия маневрирования судна для предупреждения столкновения с целью в ситуации чрезмерного сближения. Показано, что структура стратегии расхождения зависит от текущей относительной позиции судна и цели, а также их параметров движения. Предлагаемая стратегия может быть использована в бортовых автоматизированных системах предупреждения столкновений.

The strategy of maneuvering of ships in a situation of excessive proximity. We consider the strategy of maneuvering to avoid collision with the other ship (target ship) in a situation of excessive proximity. It is shown that the structure of the strategy depends on the relative positions of the vessel and target, as well as their motion parameters. The proposed strategy can be used in automated onboard systems for ship collision avoidance.

Ключевые слова: предупреждение столкновений, чрезмерное сближение, структура стратегии расхождения.

Key words: collision avoidance; excessive proximity of ships.

МЕЖДУНАРОДНЫЕ правила МППСС–72 в ситуациях чрезмерного сближения предписывают обоим судам принимать меры, обеспечивающие безопасное расхождение. В таких ситуациях оба судна принимают решения в условиях неопределенности относительно предстоящих действий партнера, поэтому безопасный исход в таких ситуациях возможен с использованием минимаксных стратегий.

Такому подходу в ситуации чрезмерного сближения посвящена работа [1, с. 32–35], в которой показано, что оптимальным курсом уклонения судна является курс, равный обратному пеленгу на опасную цель, при котором значение времени до возможного столкновения при наиболее опасном маневре цели достигает максимума. Учет угловой скорости при выборе оптимального курса уклонения рассмотрен в работе [2, с. 38–41], а выбору экстренного маневра уклонения с учетом навигационных опасностей посвящена работа [3, с. 136–140].

Целью данной публикации является рассмотрение стратегии расхождения судна при чрезмерном сближении без ограничения возможных начальных относительных позиций в ситуации отсутствия возможных навигационных опасностей и мешающих судов, причем рассматривается маневрирование судна только изменением курса, а его инерционность учитывается в первом приближении с помощью угловой скорости циркуляции.

При рассмотрении маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения исследуется только уклонение судна от опасной цели при ее непредсказуемом поведении, однако стратегия расхождения предусматривает изменение курса судна с момента обнаружения ситуации чрезмерного сближения до момента выхода на программную траекторию движения.

Как показано в работах [2; 4], в нулевой момент времени (момент обнаружения ситуации чрезмерного сближения) судно, следуя минимаксной стратегии, которая предполагает наиболее неблагоприятный маневр уклонения цели, должно лечь на курс K_0 , равный обратному пеленгу на цель, то есть $K_0 = \alpha + 180$, где α — пеленг на цель. При этом поворот на указанный курс производится в сторону от направления на цель с максимальной угловой скоростью. Данный этап стра-

тегии расхождения, который можно назвать убеганием от цели, предназначен для обеспечения максимального значения скорости изменения дистанции между судном и целью. В данной работе будем считать, что скорость цели V_c превосходит скорость судна V_o , то есть $V_c > V_o$.

На данном этапе необходимо компенсировать ситуацию чрезмерного сближения, изменяя позицию судна относительно цели так, чтобы оно оказалось в ситуации, обеспечивающей безопасное сближение и движение судна к программной траектории движения.

Таким образом, после поворота на курс K_o , когда максимально возможная дистанция кратчайшего сближения $\max L_{\min}$ не превосходит предельно допустимую дистанцию L_d , то есть $\max L_{\min} \leq L_d$, судно следует курсом $K_o = \alpha + 180$, причем этот курс изменяется с изменением пеленга α , так как происходит перемещение цели относительно судна. Очевидно, что в этом случае курс судна стремится к начальному программному курсу, а дистанция между судном и целью в общем случае увеличивается. Если скорость судна меньше скорости цели $V_c > V_o$, то при изменении курса судна на 360° относительный курс изменяется лишь в некотором секторе, достигая максимального и минимального значений, величина которых определяется выражениями [4]:

$$K_{o\min} = \pi + K_c - \arcsin \rho \quad \text{и} \quad K_{o\max} = \pi + K_c - \arcsin \rho, \quad (1)$$

где $K_{o\min}$ и $K_{o\max}$ — соответственно минимальное и максимальное значения относительного курса; K_c — курс цели; $\rho = V_o/V_c$, причем в рассматриваемом случае $\rho < 1$.

Следовательно, при $\rho < 1$ для всех истинных курсов судна из диапазона от 0 до 2π относительный курс будет принимать значения из диапазона $[K_{o\min}, K_{o\max}]$. Если же $\rho \geq 1$, то относительный курс изменяется от 0 до 2π при изменении истинного курса судна в тех же пределах.

Очевидно, если скорость судна меньше скорости цели, то максимально возможная дистанция кратчайшего сближения $\max L_{\min}$ достигается при относительных курсах $K_{o\min}$ или $K_{o\max}$. Если через K_{extr} обозначить экстремальный относительный курс ($K_{o\min}$ или $K_{o\max}$), на котором дистанция кратчайшего сближения L_{\min} максимальна, то при условии, что цель не изменяет параметры движения, выражение для $\max L_{\min}$ имеет следующий вид [4]:

$$\max L_{\min} = D \sin (K_{\text{extr}} - \alpha), \quad (2)$$

где α , D — соответственно пеленг на цель и дистанция между судном и целью.

Так как с момента времени начала отворота судна от начального программного курса пеленг α и дистанция D изменяются, то в момент времени t_{on} достижения курса судна значения курса «убегания» K_o необходимо оценить текущую относительную позицию. Для этого следует с помощью формулы (1) рассчитать экстремальные относительные курсы и вычислить максимально возможную дистанцию кратчайшего сближения $\max L_{\min}$ по формуле (2). Затем надлежит проверить справедливость неравенства $\max L_{\min} \leq L_d$. Если неравенство справедливо, то надлежит следовать курсом «убегания» K_o , удерживая курс судна противоположным пеленгу на цель, стараясь увеличить дистанцию до цели. При этом надлежит контролировать соотношение $\max L_{\min} \leq L_d$. При справедливости данного неравенства судно продолжает следовать курсом K_o до тех пор, пока максимально возможная дистанция кратчайшего сближения $\max L_{\min}$ не станет равной дистанции кратчайшего сближения L_d , то есть $\max L_{\min} = L_d$. Момент времени этого события обозначим t_{ok} . В данный момент времени необходимо изменить курс судна на величину, при которой достигается экстремальное значение относительного курса и максимальное значение дистанции кратчайшего сближения. Как показано в работе [4], экстремальные относительные курсы $K_{o\min}$ и $K_{o\max}$ достигаются соответственно при курсах судна:

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

Следуя одним из указанных курсов, судно перемещается в сторону цели, причем дистанция D между судном и целью сокращается, достигая в момент времени t_b значения предельно допустимой дистанции L_d . Начиная с этого момента времени, дистанция D увеличивается и судно ложится на курс выхода на программную траекторию K_b , причем участок выхода на программную траекторию

движения судна расположен под углом $\gamma = 30\text{--}40^\circ$ к программной траектории, то есть $K_b = K_n \pm \gamma$, где K_n — начальный курс судна.

Судно следует курсом выхода K_b до тех пор, пока не достигает программной траектории, после чего ложится на начальный курс K_n , перемещаясь по программной траектории.

Если в момент времени t_{on} достижения курса судна значения курса «убегания» K_o имеет место неравенство $\max L_{\min} \geq L_d$, то необходимо проверить возможность выхода судна на программную траекторию курсом k_b , для чего надлежит произвести контроль изменения дистанции при следовании этим курсом. Если дистанция увеличивается, то судно может выходить на заданную траекторию. В противном случае при уменьшении дистанции необходимо рассчитать дистанцию кратчайшего сближения $L_{\min b}$ при следовании курсом K_b с позиции в момент времени t_{on} . Если справедливо неравенство $L_{\min b} \geq L_d$, то судно реализует участок выхода судна на программную траекторию. Если же неравенство не выполняется, то следует рассчитать курс уклонения K_y , при котором дистанция кратчайшего сближения L_{\min} равна предельно допустимой дистанции L_d , то есть $L_{\min} = L_d$. В этом случае значение курса уклонения K_y рассчитывается по формуле [4]:

$$K_y = K_{oty} + \arcsin [\rho^{-1} \sin(K_c - K_{oty})],$$

где K_{oty} — относительный курс уклонения, который определяется из выражения

$$K_{oty} = \alpha_y + \arcsin \left(\frac{L_d}{D_y} \right),$$

где α_y и D_y — соответственно пеленг и дистанция в момент времени t_{on} .

Список литературы

1. Бурмака А. И. Разработка стратегии расхождения судов в ситуации опасного сближения / А. И. Бурмака // Судовождение: сб. науч. тр. / ОНМА. — Одесса: ИздатИнформ, 2011. — Вып. 20.
2. Бурмака А. И. Учет угловой скорости судна при расчете параметров маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения / А. И. Бурмака // Судовождение: сб. науч. тр. / ОНМА. — Одесса: ИздатИнформ, 2012. — Вып. 21.
3. Урбанский И. А. Учет навигационных опасностей при экстренном расхождении / И. А. Урбанский // Судовождение: сб. науч. тр. / ОНМА. — Одесса: ИздатИнформ, 2007. — Вып. 14.
4. Цымбал Н. Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н. Н. Цымбал, И. А. Бурмака, Е. Е. Тюпиков. — Одесса: КП ОГТ, 2007. — 424 с.