УДК 656.61.052.484

УЧЕТ ИНЕРЦИОННОСТИ СУДНА ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ В СИТУАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ СУДОВ

И.А. Бурмака[1]

Для ситуационно-технической системы предупреждения столкновений судов предложена процедура выбора маневра расхождения изменением курса, обеспечивающего безопасную дистанцию кратчайшего сближения. Предложенная процедура обеспечивает расчет момента времени начала поворота судна на заданный курс уклонения, который обеспечивает расхождение судов на безопасной допустимой дистанции кратчайшего сближения с учетом инерционности судна.

Ключевые слова: *предупреждение столкновений, курс уклонения, инерционность судна.*

В ситуациях опасного сближения характер маневра расхождения для каждого из судов предписывается международными правилами МППСС-72. В таких ситуациях, как правило, одно из судов сохраняет свои параметры движения, а второе предпринимает маневр безаварийного расхождения, изменяя курс или скорость. Если имеется достаточное водное пространство, то более предпочтительным является маневр расхождения изменением курса. Учет инерционности судна при маневрировании был рассмотрен в работах [1-3]. В работе [1] освещены вопросы определения инерционно-тормозных характеристик судов, а способ учета инерционности судна при маневрировании для предупреждения столкновений судов изложен в работах [2, 3], причем для заданного момента начала уклонения рассчитывается курс уклонения, позволяющий разойтись судам на безопасном расстоянии. Зачастую возникают ситуации, когда курс уклонения для расхождения является заданным. Например, для заметности маневра уклонения или при наличии навигационных ситуаций в районе расхождения.

Целью статьи является разработка способа расчета времени начала поворота судна на заданный курс уклонения в ситуации опасного сближения с учетом инерционных характеристик поворотливости.

Изложение материалов исследования

Если маневрирование для расхождения происходит в ситуации, когда расстояние между судами ограничено, или суда расходятся в стесненных условиях, движение оперативного судна нельзя считать безынерционным и необходимо использовать аналитический способ учета динамики судна, который может быть реализован в системе предупреждения столкновений судов.

Рассмотрим расхождение судов маневром изменением курса, когда расчет курса уклонения производится с учетом инерционности судна. Допустим, предельно-допустимая дистанция кратчайшего сближения, на которой планируется расхождение судов, равна $\Delta\widehat{l}_{ip}$.

Допустим задано значение курса уклонения судна $\widetilde{K}_y$, которому соответствует относительный курс $\widetilde{K}_{oty}$, и требуется найти момент времени t_y^* начала уклонения, который обеспечит расхождение с целью на кратчайшей дистанции $\Delta\widehat{l}_{ip}$.

Аналитическим выражением, отражающим безопасное расхождение в заданной дистанции $\Delta\widehat{l}_{ip}$, является равенство (рис. 1):

$$l(t_{yk})\sin[\widetilde{K}_{oty} - \alpha(t_{yk})] = \Delta\widehat{l}_{ip} , \qquad (1)$$

где левая часть равенства является аналитическим выражением для дистанции кратчайшего сближения, причем $l(t_{yk})$ и $\alpha(t_{yk})$ – соответственно дистанция и пеленг на цель в момент времени t_{yk} окончания поворота для расхождения с целью. При этом учитываем, что

$$t_{yk} = t_y^* + \tau ,$$

где τ - длительность поворота судна при уклонении.

Очевидно, что выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$l(t_{yk})[\sin\widetilde{K}_{oty}\cos\alpha(t_{yk}) - \cos\widetilde{K}_{oty}\sin\alpha(t_{yk})] = \Delta\widehat{l}_{ip} ,$$

или

$$\Delta\eta(t_{yk})\sin\widetilde{K}_{oty} - \Delta\xi(t_{yk})\cos\widetilde{K}_{oty} = \Delta\hat{l}_{ip} , \qquad (2)$$

где $\Delta\eta(t_{yk})$ и $\Delta\xi(t_{yk})$ – разность координат цели и судна в момент времени t_{yk}, причем

$$\Delta\eta(t_{yk}) = l(t_{yk})\cos\alpha(t_{yk}) \text{ и } \Delta\xi(t_{yk}) = l(t_{yk})\sin\alpha(t_{yk}).$$

С другой стороны, разность координат $\Delta\xi(t_{yk})$ и $\Delta\eta(t_{yk})$ определяются следующими выражениями:

$$\Delta\eta(t_{yk}) = \Delta\eta_n - V_{otn} t_y^* \cos K_{otn} - \Delta\tilde{\eta},$$
$$\Delta\xi(t_{yk}) = \Delta\xi_n - V_{otn} t_y^* \sin K_{otn} - \Delta\tilde{\xi},$$

где V_{otn} и K_{otn} - начальные значения относительных скорости и курса;

$\Delta\eta_o$, $\Delta\xi_o$, $\Delta\eta_1$, $\Delta\xi_1$ - соответственно приращения координат судна и цели за интервал времени τ.

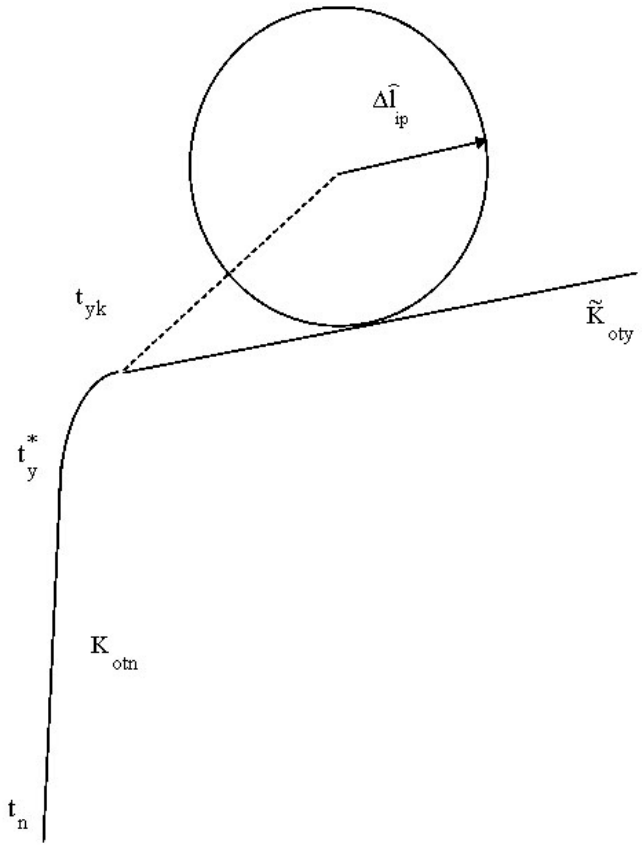

Рис. 1. Иллюстрация условия безопасного уклонения судна

С учетом приведенных обозначений выражение (2) можно записать в следующем виде:

$$(\Delta\eta_n - V_{otn} t_y^* \cos K_{otn} - \Delta\eta_o + \Delta\eta_1)\sin\tilde{K}_{oty} - \rightarrow$$
$$\rightarrow (\Delta\xi_n - V_{otn} t_y^* \sin K_{otn} - \Delta\xi_o + \Delta\xi_1)\cos\tilde{K}_{oty} = \Delta\hat{1}_{ip},$$

или

$$t_y^* V_{otn}(\sin K_{otn}\cos\tilde{K}_{oty} - \cos K_{otn}\sin\tilde{K}_{oty}) =$$
$$= \Delta\hat{1}_{ip} - (\Delta\eta_n - \Delta\eta_o + \Delta\eta_1)\sin\tilde{K}_{oty} \rightarrow$$
$$\rightarrow + (\Delta\xi_n - \Delta\xi_o + \Delta\xi_1)\cos\tilde{K}_{oty},$$

откуда несложно найти выражение для t_y^*, учитывая, что

$$\Delta\xi_n = l_n \sin\alpha_n$$

и

$$\Delta\eta_n = l_n \cos\alpha_n,$$

а также

$$\Delta\xi_1 = V_1\tau\sin K_1 \quad \text{и} \quad \Delta\eta_1 = V_1\tau\cos K_1:$$

$$t_y^* = \hat{t}_y^* - [\Delta\xi_o\cos\tilde{K}_{oty} - \Delta\eta_o\sin\tilde{K}_{oty} + V_1\tau\sin(\tilde{K}_{oty} - K_1)]/$$
$$/ V_{otn}\sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty}),$$

где V_1, K_1 - скорость и курс цели;

$\hat{t}_y^*$ - момент времени начала маневра, рассчитанный без учета динамики судна, который определяется выражением:

$$\hat{t}_y^* = [\Delta\hat{1}_{ip} + 1_n\sin(\alpha_n - \tilde{K}_{oty})]/V_{otn}\sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty}).$$

Значения величин $\Delta\eta_o$, $\Delta\xi_o$ и τ в выражении для t_y^* определяются динамической моделью, описывающей движение судна.

Поворот судна содержит две фазы кладки пера руля. Сначала, на первой фазе, в начальный момент времени производится перекладка руля на угол β_k и руль удерживается в таком положении в течение интервала времени Δt_k. Затем производится перекладка руля на противоположный борт на ту же величину и гасится инерция поворота судна в течение интервала времени Δt, по истечению которого судно выходит на заданный курс, угловая скорость поворота обращается в нуль, а перо руля приводится в диаметральную плоскость судна.

Таким образом, для расчета величины t_y^* необходимо вычислить интервалы времени Δt_k и Δt, которые в сумме дают величину времени поворота судна τ, а также приращение координат судна $\Delta\eta_o$, $\Delta\xi_o$ за это время.

Очевидно, что текущее значение курса судна на первой и второй фазах поворота имеет различное аналитическое выражение, поэтому текущее значение курса судна на первой фазе поворота обозначим через K, а на второй – через $\tilde{K}$.

Если учесть, что в результате поворота суммарное изменение курса судна задано $\Delta K = K_y - K_o$ (так как задан курс уклонения K_y) и должно быть реализовано на обеих фазах, то можно записать первое уравнение для вычисления интервалов времени Δt_k и Δt, имеющее вид:

$$\Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t).$$

Вторым уравнением для вычисления Δt_k и Δt является условие обращения в ноль к концу поворота угловой скорости судна, т. е. $\omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0$.

Решая систему полученных уравнений, находим величины Δt_k и Δt, которые позволяют вычислить приращения координат судна $\Delta\eta_o$, $\Delta\xi_o$.

Таким образом, учитывая определенную динамическую модель движения судна, получаем для нее в явном виде систему уравнений

$$\begin{cases} \Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t) \\ \omega(\Delta t_k,\ \Delta t) = 0 \end{cases}, \tag{3}$$

решая которую находим величины Δt_k, Δt, τ, $\Delta\eta_o$, $\Delta\xi_o$ и t_y^*.

В общем случае, как показано в работе [4], текущее значение курса K при повороте описывается следующим выражением:

$$K = K_o + \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o)[1\text{-}\exp(\text{-}t/T_1)], \qquad (4)$$

где K_o - начальное значение курса;

T_1 - постоянная времени судна;

ω_o и ω_r - начальное и установившееся значения угловой скорости судна.

На первой фазе поворота, длительность которой составляет интервал времени Δt_k, начальное ω_o и установившееся ω_r значения угловой скорости выражаются следующим образом:

$$\omega_o = 0 \qquad \text{и} \qquad \omega_r = k_\omega \beta_k = a_\omega .$$

В этом случае выражение (4) приобретает следующий вид:

$$K = K_o + a_\omega t - T_1 a_\omega [1\text{-}\exp(\text{-}t/T_1)\ ]\}$$

или

$$K = K_o + a_\omega \{t - T_1 [1\text{-}\exp(\text{-}t/T_1)\ ]\}. \qquad (5)$$

На второй фазе поворота в момент времени $t_y^* + \Delta t_k$ происходит перекладка руля на противоположный борт на угол $-\beta_k$ и в течение интервала времени Δt происходит одерживание судна. В этом случае начальное значение угловой скорости на момент времени Δt_k определяется выражением

$$\omega_o = a_\omega [1\text{-}\exp(\text{-}\Delta t_k / T_1)\ ]\ ,$$

а установившееся значение угловой скорости $\omega_r = -a_\omega$. Подставляем полученные значения в (4):

$$\tilde{K} = K - a_\omega t - T_1 \{\text{-}a_\omega \text{-} a_\omega [1 - \exp(\text{-}\Delta t_k / T_1)\ ]\}[1 - \exp(-t/T_1)\ ].$$

Поэтому значение текущего курса описывается зависимостью:

$$\tilde{K} = K + a_\omega \{T_1 [2\text{-}\exp(\text{-}\Delta t_k / T_1)\ ][1 - \exp(-t/T_1)\ ]\text{-}t\}. \qquad (6)$$

Для вычисления интервалов времени Δt_k и Δt необходимо составить систему уравнений (3), которая в общем случае формализует требования поворота на заданное приращение курса ΔK, а также потерю угловой скорости на момент времени выхода на новый курс.

Запишем первое уравнение системы (3) в явном виде, используя выражения (5) и (6) для составляющих $K(\Delta t_k)$ и $\tilde{K}(\Delta t)$:

$$\Delta K = a_\omega\{\Delta t_k - T_1[1-\exp(-\Delta t_k/T_1)]\}+$$
$$+a_\omega\{T_1[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)]\times\rightarrow$$
$$\rightarrow\qquad [1-\exp(-t/T_1)]-\Delta t\}.$$

Разделим обе части полученного уравнения на величину a_ω и получим:

$$\Delta K/a_\omega = \Delta t_k - T_1[1-\exp(-\Delta t_k/T_1)]\}+a_\omega\{T_1[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)]\times\rightarrow$$
$$[1-\exp(-t/T_1)]-\Delta t,$$

откуда находим выражение для расчета Δt_k методом простых итераций:

$$\Delta t_k = T_1[1-\exp(-\Delta t_k/T_1)]+$$
$$+\Delta t - T_1[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)][1-\exp(-\Delta t/T_1)]+\Delta K/a_\omega$$

с начальным приближением $\Delta t_k = \Delta K/a_\omega$.

В приведенном выражении для простых итераций необходимо еще найти связь между переменными Δt_k и Δt, т. е. величину Δt необходимо выразить через Δt_k. Для этого воспользуемся вторым уравнением системы (3) и начальными значениями угловой скорости на второй фазе поворота:

$$\omega_o = a_\omega[1-\exp(-\Delta t_k/T_1)], \qquad \omega_r = -a_\omega.$$

Поэтому получим:

$$\omega(\Delta t_k, \Delta t) = \{a_\omega[1-\exp(-\Delta t_k/T_1)] + a_\omega\}\exp(-\Delta t/T_1) - a_\omega = 0,$$

т. е.

$$a_\omega[1-\exp(-\Delta t_k/T_1) + 1]\exp(-\Delta t/T_1) - a_\omega = 0$$

или

$$a_{\omega}\{[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)]\exp(-\Delta t/T_1)-1\}=0,$$

с этого выражения можно записать:

$$[2-\exp(-t_k/T_1)]\exp(-\Delta t/T_1)=1,$$

т. е.

$$[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)]^{-1}=\exp(-\Delta t/T_1),$$

логарифмируя обе части последнего уравнения, получим:

$$-\frac{\Delta t}{T_1}=-\ln[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)],$$

или

$$\Delta t=T_1 1n\ [2-\exp(-\Delta t_k/T_1)].$$

Последнее полученное уравнение позволяет связать переменные Δt_k и Δt, чем обеспечивается итерационное вычисление длительностей каждой из фаз поворота судна, а также длительности поворота τ с одного заданного курса судна на другой.

Для расчета поправок, учитывающих инерционность судна, к моментам его поворота необходимо вычислять приращение координат $\Delta\tilde{\xi}_o$ и $\Delta\tilde{\eta}_o$ оперирующего судна за время поворота τ. Очевидно, что:

$$\Delta\tilde{\xi}_o=\int_0^{\tau}V_o\sin[K_o+K(t)]dt, \qquad \Delta\tilde{\eta}_o=\int_0^{\tau}V_o\cos[K_o+K(t)]dt.$$

Если учесть, что поворот судна содержит две фазы, причем выражение для текущего курса на первой и второй фазах имеет разный вид, то предыдущие интегралы для $\Delta\tilde{\xi}_o$ и $\Delta\tilde{\eta}_o$ принимают следующий вид:

$$\Delta\tilde{\xi}_o=\int_0^{\tau}V_o\sin[K_o+(K+\tilde{K})]dt, \quad \Delta\tilde{\eta}_o=\int_0^{\tau}V_o\cos[K_o+(K+\tilde{K})]dt.$$

Каждый из приведенных определенных интегралов является суммой двух других, описывающих приращение координат на первой и второй фазах поворота судна, т. е.

$$\Delta\tilde{\xi}_o=\int_0^{\Delta tk}V_o\sin[K_o+K]dt+\int_0^{\Delta t}V_o\sin[K_o+K(\Delta t_k)+\tilde{K}]dt,$$

$$\Delta\tilde{\eta}_o = \int_0^{\Delta tk} V_o \cos[K_o + K]dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k) + \tilde{K}]dt\,.$$

Подставляя выражения (5) и (6) в предыдущие уравнения, получим вначале выражение для приращения $\Delta\tilde{\xi}_o$:

$$\Delta\tilde{\xi}_o = \int_0^{\Delta tk} V_o \sin[K_o + a_\omega\{t - T_1[1 - \exp(-t/T_1)]\}]dt + \to$$

$$\to \int_0^{\Delta t} V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k) + a_\omega\{T_1[2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)]\times$$
$$\times[1 - \exp(-t/T_1)] - t\}]dt\,,$$

или, вынося постоянные величины из-под знака интеграла:

$$\Delta\tilde{\xi}_o = V_o \sin K_o \int_0^{\Delta tk} \cos[a_\omega\{t - T_1[1 - \exp(-t/T_1)]\}]dt + \to$$

$$+ V_o \cos K_o \int_0^{\Delta tk} \sin[a_\omega\{t - T_1[1 - \exp(-t/T_1)]\}]dt + \to$$

$$+ V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \cos[a_\omega\{T_1[2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)][1 - \exp(-t/T_1)] - t\}]dt + \to$$

$$+ V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)] \int_0^{\Delta t} \sin[a_\omega\{T_1[2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)][1 - \exp(-t/T_1)] - t\}]dt\,,$$

где

$$K(\Delta t_k) = a_\omega\{\Delta t_k - T_1[1 - \exp(-\Delta t_k/T_1)]\}\,.$$

Найдем выражение для приращения координаты $\Delta\tilde{\eta}_o$:

$$\Delta\tilde{\eta}_o = \int_0^{\Delta tk} V_o \cos[K_o + a_\omega\{t - T_1[1 - \exp(-t/T_1)]\}]dt + \to$$

$$\to \int_0^{\Delta t} V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k) + a_\omega\{T_1[2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)][1 - \exp(-t/T_1)] - t\}]dt\,.$$

Выносим постоянные величины из-под знака интеграла и получим:

$$\Delta\tilde{\eta}_o = V_o \cos K_o \int_0^{\Delta tk} \cos[a_\omega\{t - T_1[1 - \exp(-t/T_1)]\}]dt - \to$$

$$-V_o \sin K_o \int_0^{\Delta tk} \sin[a_\omega\{t-T_1[1-\exp(-t/T_1)]\}]\,dt+ \rightarrow$$

$$+V_o \cos[K_o + K(\Delta t_k)]\int_0^{\Delta t} \cos[a_\omega\{T_1[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)][1-\exp(-t/T_1)]-t\}]dt - \rightarrow$$

$$-V_o \sin[K_o + K(\Delta t_k)]\int_0^{\Delta t} \sin[a_\omega\{T_1[2-\exp(-\Delta t_k/T_1)][1-\exp(-t/T_1)]-t\}]dt.$$

Таким образом происходят вычисления необходимых значений величин Δt, Δt_k, $\Delta\tilde{\xi}_o$ и $\Delta\tilde{\eta}_o$ в случае, когда используется динамическая модель поворота судна.

Обращаем внимание на то обстоятельство, что определенные интегралы, которые входят в выражения для $\Delta\tilde{\xi}_o$ и $\Delta\tilde{\eta}_o$, не выражаются в элементарных функциях и их значения находятся численными методами, например, используется метод трапеций или, что дает более точные результаты, метод Симпсона.

Выводы

1. Получены аналитические выражения для расчета текущих значений угловой скорости и курса на обеих фазах поворота судна с учетом инерционных характеристик поворотливости, что позволило сформировать способ расчета момента времени начала поворота судна на заданный безопасный курс уклонения.
2. Предложенный способ целесообразно реализовать в ситуационно-технической системе предупреждения столкновений судов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л. Л. Судно как объект автоматического управления. – Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.

2. Бурмака И. А. Расчет длительности поворота судна при расхождении // Автоматизация судовых технических средств. – 2002. – №7. – С. 3- 6.

3. Бурмака И. А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения // Судовождение. – 2002. – № 4. – С. 32- 36.

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

Рукопись поступила в редакцию 25.12.2012 г.