УДК 656.61.052.484

Урбанский И.А., Цымбал Н.Н.
(ОНМА)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОГО ВЫХОДА СУДОВ НА ПРОГРАММНЫЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

Выбор безопасного маневра расхождения судов в стесненных условиях показывает, что задача расчета параметров маневра требует использования современной вычислительной техники, связанной с датчиками навигационной информации. Алгоритм, применяемый для расчета, должен учитывать навигационные опасности, имеющиеся мешающие суда и динамические характеристики судна. В работах [1 - 3] получены аналитические выражения, которые учитывают данные обстоятельства. Однако при моделировании процесса расхождения судов, находящихся на небольших расстояниях, оказалось, что при безопасном уклонении опасность столкновения может снова возникнуть на этапе возвращения судов на программные траектории их движения.

Для предупреждения возможных столкновений в таких ситуациях судам надлежит согласовывать свои действия на этапе выхода на программную траекторию, что не предусмотрено главным нормативным документом – Международными правилами предупреждения столкновений судов (МППСС-72). Причем наиболее эффективным является одновременное управление обоими судами относительным курсом путем изменения собственных курсов. Такая совместная стратегия может быть оптимизирована по критерию минимума риска столкновения, для чего необходимо получить аналитическую зависимость скорости изменения относительного курса от параметров поворотливости судов и начальной относительной позиции.

Поэтому целью исследования является поиск модели для дальнейшей разработки процедуры выбора согласованного изменения курсов судов, обеспечивающего безопасное возвращение на программную траекторию движения.

Возможность изменения относительного курса K_{ot} характеризуется его первой производной по времени dK_{ot}/dt, выражение для которой находим следующим образом.

Исходное выражение для относительного курса [3]:

$$K_{ot} = \arcsin[(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)/V_{ot}],$$

где K_1, V_1, K_2 и V_2 - значения курса и скорости соответственно первого и второго судов;

V_{ot} - относительная скорость, причем

$V_{ot} = [V_1^2 + V_2^2 - 2\, V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2)]^{1/2}$.

Допустим, изменяются только курсы судов K_1 и K_2. В этом случае:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \{1 - \frac{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2}{V_{ot}{}^2}\}^{-1/2} \frac{d}{dt}[\frac{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)}{V_{ot}}]. \qquad (1)$$

Введем следующие обозначения:

$$A = 1 - \frac{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2}{V_{ot}{}^2}, \quad B = \frac{d}{dt}[\frac{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)}{V_{ot}}].$$

Тогда выражение (1) принимает вид:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \{A\}^{-1/2} B. \qquad (2)$$

Найдем выражения для *A* и *B*. Очевидно:

$$A = \frac{V_{ot}{}^2 - (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2}{V_{ot}{}^2} =$$

$$= \frac{V_1^2 + V_2^2 - 2\, V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2) - (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2}{V_{ot}{}^2},$$

или, раскрывая выражение $(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)^2$, получим:

$$A = \frac{V_1^2 + V_2^2 - 2\, V_1 V_2 \cos(K_1 - K_2) - (V_1^2 \sin^2 K_1 + V_2^2 \sin^2 K_2 - 2\, V_1 V_2 \sin K_1 \sin K_2)}{V_{ot}{}^2}.$$

Окончательно получим выражение:

$$A = \frac{V_1^2(1 - \sin^2 K_1) + V_2^2(1 - \sin^2 K_2) - 2\, V_1 V_2 \cos K_1 \cos K_2)}{V_{ot}{}^2} =$$

$$\frac{V_1^2 \cos^2 K_1 + V_2^2 \cos^2 K_2 - 2\, V_1 V_2 \cos K_1 \cos K_2)}{V_{ot}{}^2} =$$

$$\frac{V_1 \cos K_1 + V_2 \cos K_2)^2}{V_{ot}{}^2}. \qquad (3)$$

Также:

$$B = \frac{d}{dt}[\frac{(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2)}{V_{ot}}] =$$

$$\frac{\frac{d}{dt}(V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) V_{ot} - (V_1 \sin K_1 - V_2 \sin K_2) \frac{d}{dt} V_{ot}}{V_{ot}{}^2}.$$

$$B=\frac{(V_1\cos K_1\frac{dK_1}{dt}-V_2\cos K_2\frac{dK_2}{dt})V_{ot}-(V_1\sin K_1-V_2\sin K_2)\frac{d}{dt}V_{ot}}{V_{ot}{}^2}. \quad (4)$$

Справедливо соотношение:

$$\frac{d}{dt}V_{ot}=\frac{d}{dt}\{[V_1^2\ +\ V_2^2\ \text{-}\ 2\ V_1V_2\ \cos(K_1\ \text{-}\ K_2\ )]^{1/2}\}=$$

$$\frac{V_1V_2\sin(K_1-K_2)(\frac{dK_1}{dt}-\frac{dK_2}{dt})}{V_{ot}}.$$

С учетом полученного выражения, подставляя в (4), находим:

$$B=\frac{(V_1\cos K_1\frac{dK_1}{dt}-V_2\cos K_2\frac{dK_2}{dt})}{V_{ot}}-$$

$$\frac{(V_1\sin K_1-V_2\sin K_2)V_1V_2\sin(K_1-K_2)(\frac{dK_1}{dt}-\frac{dK_2}{dt})}{V_{ot}{}^3}.$$

Подставляем в (2) полученное выражение и выражение (3):

$$\frac{dK_{ot}}{dt}=\frac{V_{ot}}{(V_1\ \cos K_1+V_2\ \cos K_2)}\times$$

$$[\frac{(V_1\cos K_1\frac{dK_1}{dt}-V_2\cos K_2\frac{dK_2}{dt})}{V_{ot}}-$$

$$\frac{(V_1\sin K_1-V_2\sin K_2)V_1V_2\sin(K_1-K_2)(\frac{dK_1}{dt}-\frac{dK_2}{dt})}{V_{ot}{}^3}].$$

Окончательно получим:

$$\frac{dK_{ot}}{dt}=\frac{(V_1\cos K_1\frac{dK_1}{dt}-V_2\cos K_2\frac{dK_2}{dt})}{(V_1\ \cos K_1+V_2\ \cos K_2)}-$$

$$-\frac{(V_1\sin K_1-V_2\sin K_2)V_1V_2\sin(K_1-K_2)(\frac{dK_1}{dt}-\frac{dK_2}{dt})}{(V_1\ \cos K_1+V_2\ \cos K_2)V_{ot}{}^2}. \quad (5)$$

Полученное выражение для скорости изменения относительного курса dK_{ot}/dt носит универсальный характер для произвольного закона изменения курсов судов.

Для оценки dK_{ot}/dt в первом приближении, волне приемлемом во многих практических приложениях, принимается вращательное движение с постоянными угловыми скоростями ω_1 и ω_2. В этом случае справедливы следующие соотношения:

$$K_1 = K_{1o} + \omega_1 t\ ;\ \omega_1 = const\ ;\ \frac{dK_1}{dt} = \omega_1\ ;$$

$$K_2 = K_{2o} + \omega_2 t\ ;\ \omega_2 = const\ ;\ \frac{dK_2}{dt} = \omega_2\ .$$

Базовая зависимость (5) принимает следующий вид:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{(V_1 \cos(K_{1o} + \omega_1 t)\omega_1 - V_2 \cos(K_{2o} + \omega_2 t)\omega_2)}{(V_1\ \cos K_1 + V_2\ \cos K_2)} -$$
$$- \frac{(V_1 \sin(K_{1o} + \omega_1 t) - V_2 \sin(K_{2o} + \omega_2 t))V_1 V_2 \sin(\Delta K_o + \omega_1 t - \omega_2 t)(\omega_1 - \omega_2)}{(V_1\ \cos K_1 + V_2\ \cos K_2)V_{ot}{}^2},$$

где $\Delta K_o = K_{1o} - K_{2o}$.

Если обозначить $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$, то окончательно получим:

$$\frac{dK_{ot}}{dt} = \frac{(V_1 \cos(K_{1o} + \omega_1 t)\omega_1 - V_2 \cos(K_{2o} + \omega_2 t)\omega_2)}{(V_1\ \cos K_1 + V_2\ \cos K_2)} -$$
$$- \frac{(V_1 \sin(K_{1o} + \omega_1 t) - V_2 \sin(K_{2o} + \omega_2 t))V_1 V_2 \sin(\Delta K_o + \Delta\omega t)\Delta\omega}{(V_1\ \cos K_1 + V_2\ \cos K_2)V_{ot}{}^2}.$$

Проверка корректности полученного выражения производилась расчетом значений скорости изменения относительного курса для различных исходных данных и дала положительный результат.

Полученная математическая модель предлагается для использования в автоматизированных системах предупреждения столкновений судов, с ее помощью реализуется способ безопасного возвращения судов на программные траектории движения путем выбора величин и знаков их угловых скоростей.

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: КП ОГТ, 2007. – 424 с.