

ВЫБОР МАНЕВРА РАСХОЖДЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЕМ КУРСА
СУДНА

Предупреждение столкновений судов достигается маневрами изменения их курса или скорости, причем при наличии достаточного водного пространства предпочтение отдается маневру изменения курса судна. Маневр расхождения должен вести к увеличению дистанции кратчайшего сближения между судном и целью.

Поэтому обеспечение эффективности маневра уклонения судна от опасной цели с учетом приращения дистанции кратчайшего сближения является актуальным и перспективным.

В работах [1 – 3] рассмотрены вопросы влияния изменения параметров движения судна на относительный курс, позволяющие определить корректные маневры, которые ведут к увеличению дистанции кратчайшего сближения и обеспечивают безопасное расхождение судов.

Вопросы эффективности парных стратегий расходящихся судов исследованы в работе [1], в которой предложен метод оценки эффективности парных стратегий расхождения судов, включая маневр одного из судов при неизменных параметрах движения второго судна и одновременный совместный маневр обоих судов.

В работе [2] рассмотрена процедура расчета изменения относительного курса при увеличении курса судна, а работа [3] посвящена влиянию изменения скорости судна на относительный курс.

Целью статьи является анализ зависимости приращения дистанции кратчайшего сближения от курса судна для выбора безопасного маневра расхождения.

Рассмотрим закономерности изменения дистанции кратчайшего сближения D_m судна с целью в зависимости от курса судна K_1 . Другими словами, необходимо найти аналитическое выражение первой производной дистанции кратчайшего сближения по курсу судна $\partial D_m / \partial K_1$, и произвести его анализ при изменении K_1 .

С этой целью вначале найдем выражение дистанции кратчайшего сближения D_m (рис. 1).

Из рис. 1 следует, что

$$D_m = D \sin(\alpha - K_{от}), \quad (1)$$

где D и α – дистанция и пеленг на цель; $K_{от}$ – относительный курс, который является функцией курса K_1 .

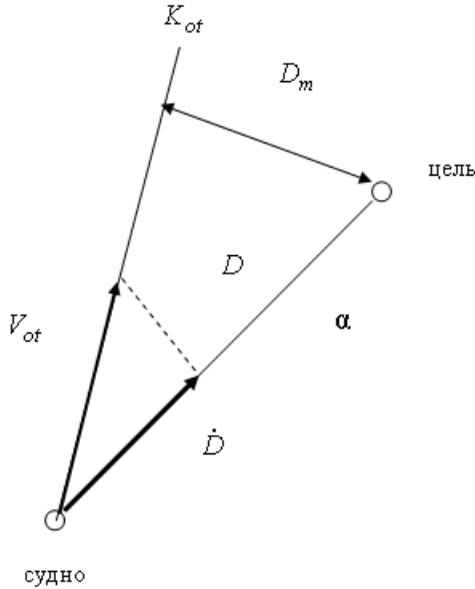


Рис. 1. Определение скорости сближения \dot{D} и кратчайшей дистанции D_m

Ситуация опасного сближения возникает лишь при уменьшении текущей дистанции, при этом $\dot{D} < 0$. В дальнейшем потребуется выражение для скорости изменения текущей дистанции \dot{D} , которое также можно получить из рис. 1. Учитывая, что в относительном движении неподвижной является цель, то:

$$\dot{D} = -V_{ot} \cos(\alpha - K_{ot}). \quad (2)$$

Дифференцируя выражение (1), получим:

$$\frac{\partial D_m}{\partial K_1} = -D \cos(\alpha - K_{ot}) \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}, \text{ или}$$

$$\frac{\partial D_m}{\partial K_1} = -\frac{V_{ot}}{V_{ot}} D \cos(\alpha - K_{ot}) \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}.$$

С учетом выражения (2) последнее уравнение принимает вид:

$$\frac{\partial D_m}{\partial K_1} = -\frac{D}{V_{ot}} \dot{D} \frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}.$$

Знак производной $\partial D_m / \partial K_1$ также зависит от соотношения величин α и K_{ot} , которое обозначим q , причем знак величины q опреде-

ляется знаком $\sin(K_{ot} - \alpha)$, т.е. $q = \text{sign}[\sin(K_{ot} - \alpha)]$.

При сближении судов $\dot{D} < 0$, поэтому

$$\text{sign}\left(\frac{\partial D_m}{\partial K_1}\right) = q \text{sign}\left(\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1}\right). \quad (3)$$

Рассмотрим производную $\partial K_{ot} / \partial K_1$. Из работы [1]:

$$\frac{\partial K_{ot}}{\partial K_1} = \frac{V_1[V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)]}{V_{ot}^2}.$$

Знак выражения $\partial K_{ot} / \partial K_1$ соответствует знаку выражения $V_1 - V_2 \cos(K_1 - K_2)$.

Анализ полученного выражения для первой производной $\partial K_{ot} / \partial K_1$ показывает, что в случае $V_1 > V_2$ первая производная положительная для всех значений K_1 . Если же $V_1 < V_2$, знак первой производной может иметь как положительное, так и отрицательное значения.

Это означает, что в первом случае ($V_1 > V_2$) относительный курс K_{ot} может принимать любые значения от 0 до 2π , а при $V_1 < V_2$ область значений K_{ot} ограничивается экстремальными значениями, которые обозначим $K_{ot \min}$ и $K_{ot \max}$. Этим относительным курсам соответствуют курсы судна $K_{1 \min}$ и $K_{1 \max}$, которые получены в работе [4]:

$$K_{1 \min} = K_2 + \arccos \rho \quad \text{и} \quad K_{1 \max} = K_2 - \arccos \rho,$$

где $\rho = V_1 / V_2$.

Экстремальные значения относительных курсов $K_{ot \min}$ и $K_{ot \max}$ из той же работы

$$K_{ot \min} = \pi + K_2 - \arcsin \rho, \quad K_{ot \max} = \pi + K_2 + \arcsin \rho.$$

Следовательно, при $\rho < 1$ для всех истинных курсов судна K_1 из диапазона от 0 до 2π относительный курс будет принимать значения из диапазона $[K_{ot \min}, K_{ot \max}]$ (рис. 2). Если же $\rho \geq 1$, то относительный курс изменяется от 0 до 2π при изменении истинного курса судна K_1 в тех же пределах.

Таким образом, при $\rho \geq 1$ знак производной $\partial D_m / \partial K_1$

$$\text{sign}\left(\frac{\partial D_m}{\partial K_1}\right) = q.$$

В случае $\rho < 1$ производная $\partial D_m / \partial K_1$ имеет знак

$$\text{sign}\left(\frac{\partial D_m}{\partial K_1}\right) = \begin{cases} q, & K_1 \in (K_2 + \arccos \rho, K_2 - \arccos \rho), \\ -q, & K_1 \in (K_2 - \arccos \rho, K_2 + \arccos \rho). \end{cases}$$

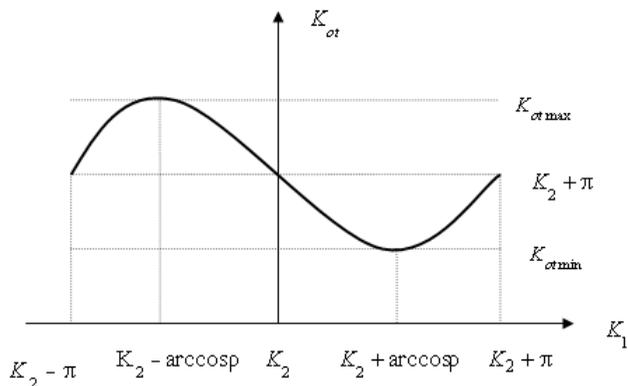


Рис. 2. Зависимость относительного курса K_{ot} от курса судна K_1 при $\rho < 1$

Данное выражение позволяет выбрать сторону безопасного уклонения судна для предупреждения столкновения.

Для анализа полученной зависимости знака изменения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} от изменения курса судна K_1 производилось имитационное моделирование. С этой целью была написана компьютерная программа на языке Delphi, в которую вводятся значения дистанции D между судном и целью, пеленг с судна на цель α , параметры движения судна K_1 , V_1 и цели K_2 , V_2 .

Программа рассчитывает и выводит значения дистанции кратчайшего сближения D_{\min} , скорости изменения дистанции \dot{D} и изменения дистанции кратчайшего сближения $\partial D_{\min} / \partial K_1$.

Также выводится графическая зависимость \dot{D} от K_1 , и зависимость $\partial D_{\min} / \partial K_1$ от K_1 и фиксируется сближение или удаление судна и цели.

При имитационном моделировании рассматривались различные ситуации соотношения скоростей судна и цели. Здесь приведены результаты моделирования ситуации, когда скорость судна превосходит скорость цели $V_1 > V_2$, которые представлены в табл. При моделировании были выбраны следующие значения скоростей $V_1 = 25$ уз. и $V_2 = 15$ уз.

Как следует из табл., в этой ситуации производная $\partial D_{\min} / \partial K_1$ имеет участок положительных значений и участок отрицательных значений в зависимости от знака параметра q .

Таблица
Зависимость изменения D_{\min} от K_1 для различных K_2 при $V_1 > V_2$

K_2	Увеличение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} > 0$)	Уменьшение D_{\min} ($\frac{\partial D_{\min}}{\partial K_1} < 0$)
0	$K_1 \in (20..110)$	$K_1 \in (340..20)$
90	$K_1 \in (70..110)$	$K_1 \in (340..70)$
180	$K_1 \in (70..160)$	$K_1 \in (290..70)$
270	$K_1 \in (20..160)$	$K_1 \in (290..20)$

Таким образом, получена аналитическая зависимость изменения дистанции кратчайшего сближения судна с целью от значения курса судна, которая позволяет выбрать сторону безопасного уклонения судна для предупреждения столкновения.

Показано, что знак первой производной дистанции кратчайшего сближения зависит от отношения скоростей судна и цели, а также от разности пеленга на цель и относительного курса.

С помощью имитационного моделирования проверена предложенная аналитическая зависимость, что подтвердило корректность полученного результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов/ Пятаков Э.Н., Заичко С.И. // Судовождение. – 2008. – № 15. – С. 166 –171.
2. Булгаков А.Ю. Расчет изменения относительного курса в автоматизированных системах принятия решений // Проблемы техники: науково-виробничий журнал. – 2013. – №4. – С. 107 – 118.
3. Пятаков Э.Н. Учет в автоматизированных системах принятия решений влияния изменения скорости судна на относительный курс // Проблемы техники: науково-виробничий журнал. – 2013. – №4 . – С. 140 – 144.
4. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.