

МАНЕВР РАСХОЖДЕНИЯ ТРЕХ СУДОВ ИЗМЕНЕНИЕМ КУРСОВ

Одной из наиболее актуальных является проблема обеспечения безопасного расхождения судов в случае возникновения угрозы их столкновения.

Стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов оборудуются станциями управления движением судов (СУДС). Поэтому исследование вопросов управления несколькими судами, следующих опасными курсами сближения, чему посвящена настоящая статья, является актуальным и перспективным направлением.

Работа [1] посвящена вопросам расхождения судов с использованием классификации начальных ситуаций, а в работе [2] приведены результаты исследования эффективности парных маневров расхождения. Однако малоисследованными являются вопросы внешнего управления группой опасно сближающихся судов, что очень актуально для СУДС, которые должны решать задачи одновременного опасного сближения нескольких пар судов, составляющих группу.

Целью статьи является разработка процедуры определения совместного маневра расхождения изменением курса при опасном одновременном сближении более чем одной пары судов, причем закономерности возникающей ситуации проявляются при минимальном числе трех судов и могут быть распространены для большего количества судов.

Рассмотрим ситуацию, когда в районе контроля СУДС опасно сближаются три судна. В начальный момент времени их взаимное положение характеризуется пеленгами α_{ij} и дистанциями D_{ij} ($i \neq j$), а взаимное перемещение – относительными курсами K_{otij} и скоростями V_{otij} . Дистанции кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ каждой пары судов меньше предельно-допустимой дистанции d_d ($\min D_{ij} < d_d$), т.е. все три судна сближаются опасно.

СУДС, осуществляющей управление судами, необходимо найти курсы судов K_i при неизменных скоростях V_i , при которых их дистанции кратчайшего сближения будут больше предельно- допустимой дистанции d_d .

Используя из работы [3] выражение для $\min D_{ij}$, условие безопасного расхождения записывается следующим образом:

$$\begin{cases} \min D_{12} = \Delta_{12} D_{12} \sin(\alpha_{12} - K_{ot12}) \geq d_d; \\ \min D_{13} = \Delta_{13} D_{13} \sin(\alpha_{13} - K_{ot13}) \geq d_d; \\ \min D_{23} = \Delta_{23} D_{23} \sin(\alpha_{23} - K_{ot23}) \geq d_d, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Delta_{ij} = -1$, при $\sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) < 0$, в противном случае $\Delta_{ij} = 1$.

Дистанцию кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ можно увеличить приращением относительных курсов K_{otij} , изменяя курсы судов K_i . Найдем значения курсов судов, обеспечивающих выполнение условия (1).

Каждое из неравенств (1) можно представить в следующем виде:

$$\Delta_{ij} D_{ij} \sin(\alpha_{ij} - K_{otij}) \geq d_d, \text{ или } \alpha_{ij} - K_{otij} \geq \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right), (i, j = 1 \dots 3).$$

Из последнего неравенства можно записать:

$$\operatorname{tg} K_{otij} \leq \operatorname{tg}[\alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right)]. \quad (2)$$

Величина $\operatorname{tg} K_{otij}$ является функцией курсов судов K_i и K_j , и согласно [3]

$$\operatorname{tg} K_{otij} = \frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j}.$$

С учетом приведенных результатов выражение (2) принимает вид:

$$\frac{V_i \sin K_i - V_j \sin K_j}{V_i \cos K_i - V_j \cos K_j} \leq \operatorname{tg} \left[\alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right) \right].$$

Если обозначим $\gamma_{ij} = \alpha_{ij} - \arcsin\left(\frac{d_d}{\Delta_{ij} D_{ij}}\right)$, то получим

$$(\sin K_i \cos \gamma_{ij} - \cos K_i \sin \gamma_{ij}) \leq \rho_{ij} (\sin K_j \cos \gamma_{ij} - \cos K_j \sin \gamma_{ij}), \quad (3)$$

где $\rho_{ij} = V_j / V_i$.

Используя уравнение (3), запишем систему неравенств для трех судов:

$$\begin{cases} (\sin K_1 \cos \gamma_{12} - \cos K_1 \sin \gamma_{12}) \leq \rho_{12} (\sin K_2 \cos \gamma_{12} - \cos K_2 \sin \gamma_{12}); \\ (\sin K_1 \cos \gamma_{13} - \cos K_1 \sin \gamma_{13}) \leq \rho_{13} (\sin K_3 \cos \gamma_{13} - \cos K_3 \sin \gamma_{13}); \\ (\sin K_2 \cos \gamma_{23} - \cos K_2 \sin \gamma_{23}) \leq \rho_{23} (\sin K_3 \cos \gamma_{23} - \cos K_3 \sin \gamma_{23}). \end{cases} \quad (4)$$

Приведенная система неравенств содержит три искомые перемен-

ные K_1 , K_2 и K_3 . ешая систему (4) относительно курсов судов, определим параметры совместного маневра изменения курсов судов, обеспечивающего их безопасное расхождение.

Для решения системы неравенств (4) вначале рассмотрим соответствующую систему равенств:

$$\begin{cases} (\sin K_1 \cos \gamma_{12} - \cos K_1 \sin \gamma_{12}) = \rho_{12} (\sin K_2 \cos \gamma_{12} - \cos K_2 \sin \gamma_{12}); \\ (\sin K_1 \cos \gamma_{13} - \cos K_1 \sin \gamma_{13}) = \rho_{13} (\sin K_3 \cos \gamma_{13} - \cos K_3 \sin \gamma_{13}); \\ (\sin K_2 \cos \gamma_{23} - \cos K_2 \sin \gamma_{23}) = \rho_{23} (\sin K_3 \cos \gamma_{23} - \cos K_3 \sin \gamma_{23}), \end{cases} \quad (5)$$

каждое уравнение которой представляет аналитическое выражения границы опасной области S_{Dij} , ограждающей недопустимые сочетания значений пар соответствующих курсов K_i и K_j . Получив из системы уравнений (5) опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , следует выбрать такие значения K_1 , K_2 и K_3 , парные сочетания которых не принадлежали бы соответствующим опасным областям, что аналитически выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} (K_1, K_2) &\notin S_{D12}; \\ (K_1, K_3) &\notin S_{D13}; \\ (K_2, K_3) &\notin S_{D23}. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученные значения курсов судов обеспечат их расхождение на расстояниях, превосходящих предельно-допустимую дистанцию сближения.

В качестве примера рассмотрим ситуацию сближения трех судов с параметрами:

$$\begin{aligned} V_1 = 20, V_2 = 12, V_3 = 20, K_1 = 60, K_2 = 180, K_3 = 300, \alpha_{12} = 45, \\ \alpha_{13} = 75, \alpha_{32} = 315, D_{12} = 3,0, D_{13} = 3,5, D_{32} = 2,5. \end{aligned}$$

Начальная ситуация показана на рис. 1. Начальные позиции судов обозначены цифрами 1, 2 и 3. Направление и скорость движения судов показаны векторами V_1 , V_2 и V_3 .

Для каждой пары судов с помощью соотношений (5) на компьютере рассчитывались опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , которые представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, парные значения начальных курсов судов принадлежат опасным областям, соответственно это точки $A12$, $A23$ и $A13$. Следовательно, дистанции кратчайшего сближения каждой пары судов меньше предельно-допустимой дистанции.

Для безопасного расхождения необходимо изменить курсы не меньше, чем двух судов, так, чтобы парные курсы (K_i, K_j) не принадлежали опасным областям, т.е. выполнялось требование (6).

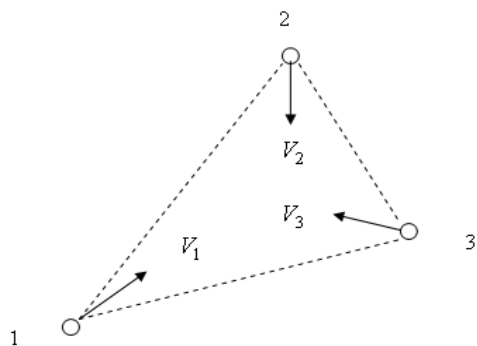


Рис. 1. Начальная ситуация опасного сближения трех судов

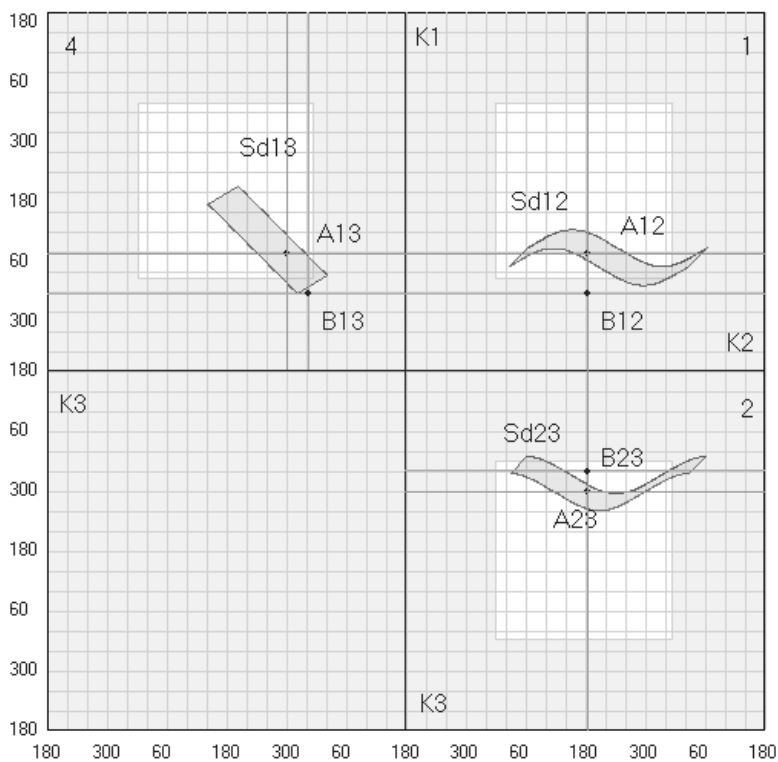


Рис. 2. Опасные области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23}

Выбор курсов уклонения для безопасного расхождения удобно производить графическим способом при наличии графического отображения опасных областей S_{Dij} , как показано на рис. 2. Анализ положения опасных областей показывает, что удобнее всего изменить курсы первого и третьего судов, причем их отклонение от начальных курсов будет минимальным. Для первого судна целесообразно изменить курс влево до значения 340° . В этом случае, как следует из рис. 2, парные курсы (K_1, K_2) и (K_1, K_3) не попадают в соответствующие опасные области при минимальном изменении курса K_1 .

Аналогично, при минимальном изменении курса K_3 вправо на курс 340° парные значения курсов, которые показаны на рис. 2 точками B_{12} , B_{23} и B_{13} не попадают в области S_{D12} , S_{D13} и S_{D23} , и суда безопасно расходятся.

На рис. 3 показана ситуация безопасного расхождения судов, причем второе судно не изменяет курс, первое судно уклоняется влево на курс $K_1 = 340^\circ$, а третье судно изменяет курс вправо до значения $K_3 = 340^\circ$.

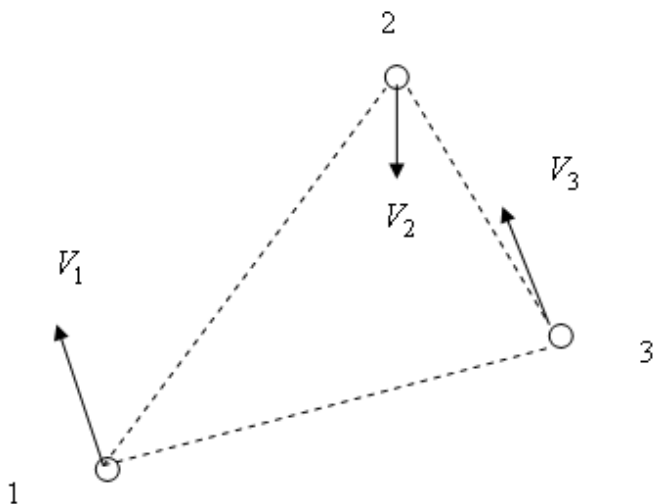


Рис. 3. Ситуация безопасного расхождения изменением курсов K_1 и K_3

Таким образом, предложена процедура отображения опасной области парных курсов двух судов и определения безопасных курсов уклонения графическим способом при опасном сближении трех судов.

В дальнейшем целесообразно разработать аналитическую процедуру расчета безопасных курсов уклонения нескольких судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
2. Пятаков Э.Н. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Пятаков Э.Н., Заичко С.И // Судовождение: Сб. науч. трудов. / ОНМА, – Вып.15. – Одесса: "ИздатИнформ", 2008. – С. 166 – 171.
3. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.