УДК 656.61.052.484

Бурмака И.А., Булгаков А.Ю.
ОНМА

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВЕКТОРА УПРАВЛЕНИЯ СУДАМИ ИЗМЕНЕНИЕМ КУРСОВ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО РАСХОЖДЕНИЯ

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

Для контроля процесса судовождения и управления движением опасно сближающихся судов стесненные районы плавания с особенно интенсивным движением оборудуются станциями управления движением судов (СУДС).

Вопросам расхождения судов с использованием классификации начальных ситуаций посвящена работа [1], а в работе [2] приведены результаты исследования эффективности парных маневров расхождения. Однако малоисследованными остаются вопросы внешнего управления группой опасно сближающихся судов, что очень актуально для СУДС, которые должны решать задачи опасного сближения группы судов.

Целью работы является формализация процедуры выбора оптимального вектора управления группой опасно сближающихся судов при их управлении СУДС.

Рассмотрим ситуацию, когда в группе, состоящей из n взаимодействующих судов, возникает ситуационное возмущение, компенсация которого производится вектором управления $u = \{\Delta K_i\}$, где ΔK_i – изменение курсов каждого из судов. Значения ΔK_i выбираются таким образом, чтобы дистанции кратчайшего сближения $\min D_{ij}$ каждой пары судов были бы не меньше предельно-допустимой дистанции d_d, т.е. $\min D_{ij} \geq d_d$.

Множество значений управляющего вектора U, при которых для всех $\min D_{ij}$ выполняется условие $\min D_{ij} \geq d_d$, составляет его допустимую область U_d. Каждому значению вектора управления $u = \{\Delta K_i\} \in U_d$ соответствует критерий оптимальности $Q = \sum_{i=1}^{n} \Delta K_i^2$, который представляет собой квадрат расстояния в n – мерном пространстве $\Delta K_1 \times \ldots \times \Delta K_i \times \ldots \times \Delta K_n$. Очевидно, что оптимальное значение вектора управления $u_o = \{\Delta K_i\}$ достигается при минимуме критерия оптимальности Q, т.е. $\sum_{i=1}^{n} \Delta K_i^2 = \min$. Это означает, что при минимальном значении Q суда безопасно расходятся на кратчайших расстояниях $\min D_{ij} \geq d_d$ при минимальных отклонениях судов от их начальных курсов.

С учетом вышеизложенного задача выбора оптимального вектора управления формализуется следующим образом:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \Delta K_i^2 \to \min,$$

$$\min D_{ij} \geq d_d . \tag{1}$$

Условие (1) как показано в работе [3], можно записать следующим образом:

$$(K_i, K_j) \notin S_{Dij},$$

где S_{Dij} – область недопустимых парных курсов пары сближающихся судов.

Учитываем, что $K_k = K_{nk} + \Delta K_k$, где K_{nk} – начальное значение курса k-го судна, и получим:

$$(K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij} .$$

Поэтому выражение для исходной задачи (1) принимает следующий вид:

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \Delta K_i^2 \to \min,$$

$$(K_{ni} + \Delta K_i, K_{nj} + \Delta K_j) \notin S_{Dij} .$$

Найдем значения изменений курсов каждого из судов ΔK_k, при которых достигается минимум критерия оптимальности Q, для чего найдем частные производные критерия оптимальности Q по каждой из переменных ΔK_k и приравняем их к нулю, т.е. $\partial Q / \partial \Delta K_k = 0$. С учетом выражения для Q, получим:

$$\frac{\partial}{\partial \Delta K_k} \left(\sum_{i=1}^{n} \Delta K_i^2 \right) = 2\Delta K_k = 0,$$

откуда следует, что минимальное значение критерия оптимальности Q достигается при стремлении к нулю изменений курсов каждого из судов ΔK_k. Так как при опасном сближении пары судов точка (K_i, K_j) находится в опасной области S_{Dij}, то минимальное изменение курса достигается при значении курса уклонения, соответствующего границе опасной области. Если точки границы опасной области обозначить (K_i^*, K_j^*), то минимальное допустимое значение изменение курса ΔK_k, обеспечивающее минимум критерия оптимальности Q, определяется выражением:

$$\Delta K_k = 0 \text{, если } (K_{nk}, K_{nj}) \notin S_{Dij};$$

$$\Delta K_k = K_k^* - K_{nk} \text{, если } (K_{nk}, K_{nj}) \in S_{Dij}. \qquad (2)$$

Если изменения курсов судов ΔK_k выбрать в соответствии с выражением (2), то будет реализован оптимальный вектор управления $u_o = \{\Delta K_i\} \in U_d$, принадлежащий к допустимой области, который обеспечивает минимальное значение критерия оптимальности Q.

В зависимости от структуры матрицы ситуационного возмущения W_{bn} безопасное расхождение судов может потребовать изменения курса различного количества судов взаимодействующей группы (от одного до всех). Поэтому более предпочтительным является маневр расхождения, в котором изменяют курс меньшее количество судов. Другими словами, предпочтительней является управляющий вектор, у которого большее число компонент равно нулю. Однако для каждого значения управляющего вектора U_m с заданным значением m ненулевых компонент ΔK_i определено граничное значение критерия оптимальности Q_m^*, которое регламентирует необходимость увеличения на единицу размерности управляющего вектора U_{m+1}.

В качестве примера рассмотрим ситуацию опасного сближения четырех судов. Если использовать маневр (K_1, K_3, K_4), то условие обращения матрицы возмущения W_{bn} в нулевую матрицу имеет следующий вид:

$$Q_4^{(\Sigma 3)} = (\Delta K_1^2 + \Delta K_3^2 + \Delta K_4^2) \to \min;$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n2}) \notin S_{D12};$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D13};$$

$$(K_{n1} + \Delta K_1, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D14};$$

$$(K_{n2}, K_{n3} + \Delta K_3) \notin S_{D23};$$

$$(K_{n2}, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D24};$$

$$(K_{n3} + \Delta K_3, K_{n4} + \Delta K_4) \notin S_{D34} .$$

На рис. показано графическое отображение опасных областей в ситуации сближения четырех судов. На монитор выводятся шесть расширенных плоскостей $K_1 \times K_2$, $K_1 \times K_3$, $K_1 \times K_4$, $K_2 \times K_3$, $K_2 \times K_4$ и $K_3 \times K_4$, на которых отображаются области опасных курсов S_{D12}, S_{D13}, S_{D14}, S_{D23}, S_{D24} и S_{D34}.

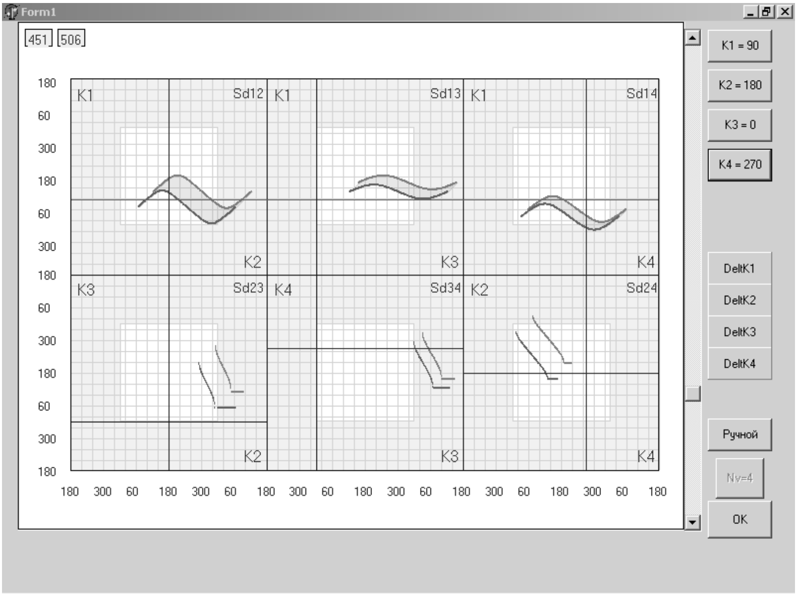

Рис. Области опасных курсов четырех судов

Графический способ компьютерного моделирования для определения оператором параметров оптимального маневра расхождения группы судов предусматривает выбор такого положения линий, фиксирующих значения соответствующих парных курсов, при котором точка парного курса (K_i, K_j) находится вне области опасных курсов S_{Dij}, причем изменение курсов возможно с помощью линейки прокрутки после использования клавиш "$K1$", "$K2$", "$K3$" или "$K4$".

На рис. показана ситуация, при которой выбраны курсы судов, обеспечивающие их безопасное расхождение.

Таким образом, предложенный графический способ компьютерного моделирования позволяет выбирать оптимальный вектор управления группой судов, используя отображения области опасных курсов пар судов.

Отметим, что использование графического способа компьютерного моделирования для определения оператором параметров оптимального маневра расхождения группы судов возможно для числа судов в группе, не превышающего пяти. Это обусловлено невозможностью одновременного отображения расширенных плоскостей и опасных областей курсов судов на мониторе компьютера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Пятаков Э.Н.. Оценка эффективности парных стратегий расходящихся судов / Э.Н. Пятаков, С.И. Заичко // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА. – Вып. 15. – Одесса: ИздатИнформ, 2008. – С. 166 – 171.

3. Бурмака И.А. Маневр расхождения трех судов изменением курсов/ И.А.Бурмака, А.Ю. Булгаков // Автоматизация судовых технических средств: науч. -техн. сб. – 2014. – Вып. 20. – Одесса: ОНМА. – С. 18 – 23.