УДК 656.61.052.484

FORMALIZATION OF BASIC CHARACTERISTICS FOR VESSELS' GUIDED DYNAMIC SYSTEM

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СУДОВ

A. Y. Bulgakov, *PhD student*

А.Ю. Булгаков, *аспирант*

Odessa National Maritime Academy, Ukraine
Одесская Национальная Морская Академия, Украина

ABSTRACT

The options of vessels's guided dynamic system formalization from the safety of navigation perspective are proposed. The approach offered allows the possibility of vessels external handling with estimation of a joint control vector that may considerably improve safety.

Key words: safety of navigation, risk of collision, guided dynamic systems, safety criteria.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

В стесненных водах, особенно в узкостях и при подходах к портам, интенсивность судоходства очень высокая, и зачастую возникают группы судов, затрудняющих движение друг друга, что ведет к возникновению опасных ситуаций с угрозой столкновения. В таких районах управление судопотоком осуществляется СУДС. Эффективность и безопасность движения в районе действия СУДС определяющим образом зависят от достоверной оценки текущей ситуации в зоне управления СУДС и корректности алгоритмов управления, что требует формализации судопотока, как управляемой динамической системы судов с внешним управлением. Поэтому формализация характеристик такой системы для организации оптимального управления судопотоком является актуальной и своевременной тематикой, чему и посвящена настоящая работа.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

В работе [1] подробно рассмотрена проблема предупреждения столкновения судов в случае их опасного сближения, причем в работе исследованы различные ситуации сближения судов и предложены маневры их безопасного расхождения.

Вопросы описания многоуправляемой динамической системы взаимодействующих судов с позиций внешнего управления и формализации взаимодействия судов рассмотрены в работе [2]. В работе [3] рассмотрена

проблема совместного управления ситуацией расхождения взаимодействующими судами, что послужило для разработки областей взаимных обязанностей судов при опасном сближении. Работа [4] посвящена проблеме управления взаимодействием судов при возникновении угрозы столкновения, что может послужить для разработки альтернативной системы бинарной координации. Процедура выбора маневра расхождения судов с учетом требований МППСС-72 предложена в работе [5]. Вопросы формализации системы взаимодействующей группы судов не достаточно освещены в литературе и требуют дальнейшего исследования.

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью данной статьи является анализ возможностей математического описания совокупности судов с позиций управляемой динамической системы и определения ее основных характеристик для определения уровня безопасности.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Совокупность судов, находящихся в районе управления СУДС, целесообразно рассматривать с системных позиций, характеризуя ее как управляемую динамическую систему Σ_n , причем реализуется внешнее управление, которое в зависимости от текущего состояния системы s_Σ формирует вектор управления U_Σ с числом составляющих, равным числу судов, составляющих систему. Управление должно обеспечить пребывание системы в области допустимых безопасных состояний.

Допустим, в локальном районе, который контролируется СУДС, имеется n судов, которые составляют управляемую динамическую систему Σ_n . Определим основные характеристики системы Σ_n . Прежде всего, исходными характеристиками являются позиционная и параметров движения. Позиционная характеристика определяется вектором координат судов Φ , каждая компонента которого является координатами отдельного судна, т. е. $\varphi_i = (x_i, y_i)$, причем координаты x_i и y_i определяются широтой и долготой соответствующего судна.

Характеристикой параметров движения системы Σ_n является вектор скоростей судов системы V , каждая компонента которой содержит направление (курс) и модуль скорости каждого из судов $\bar{v}_i = (K_i, V_i)$.

Указанные позиционные характеристики системы Σ_n не отражают системные особенности Σ_n , этого недостатка лишены относительные характеристики, которые определяют совокупность парных отношений компонентов системы.

Позиционной характеристикой системы Σ_n является матрица относительных позиций S , элементом которой является позиционные характеристики пары судов системы Σ_n , - дистанция D_{ij} и пеленг α_{ij} , т.е. $s_{ij} = (D_{ij}, \alpha_{ij})$. Очевидно,

позиционную матрицу удобно представить двумя матрицами: матрицей дистанций $D = (D_{ij})$ и матрицей пеленгов $A = (\alpha_{ij})$.

В паре судов c_i и c_j оперирующим судном будет являться то, с которого задается пеленг, а судно, на которое измеряется пеленг, - целью. Тогда в позиционных матрицах D и A столбцы формируются по оперирующим судам, а строки – по целям.

Произведем анализ матриц D и A . Матрица D является симметричной, диагональ которой содержит нули, при этом $D_{ij} = D_{ji}$. Для матрицы A диагональ не определена и диагональные моменты выражаются курсами судов, т.е. $\alpha_{ii} = K_i$, а для недиагональных элементов справедливо соотношение $\alpha_{ij} = \pi + \alpha_{ji}$.

Взаимное перемещение судов системы Σ_n характеризуется матрицей относительных скоростей V_{ot} , элементом которой является относительная скорость V_{otij} пары судов, причем в относительном перемещении будем принимать движение оперирующего судна относительно неподвижной цели.

Матрица V_{ot} является квадратной и симметричной с нулевой диагоналей, в которой справедливо соотношение $V_{otij} = V_{otji}$. Второй матрицей, характеризующей относительное перемещение, является матрица относительных курсов K_{ot} , которая определяет направление относительного движения оперирующего судна по отношению к цели. Ее элементом является K_{otij} .

Отметим, что диагональ матрицы не определена, а симметричные относительно диагонали элементы матрицы соотносятся следующим образом

$$K_{otij} = \pi + K_{otji}.$$

Направление относительного движения пары судов не несет информации о характере их сближения или удаления, что существенно для оценки возможной опасности их относительного перемещения. Поэтому целесообразно ввести характеристику изменения дистанции между судами системы. Мерой такой характеристики для системы является матрица изменения дистанций Δ , а ее элементом является δ_{ij} , значение которого определяется знаком первой производной дистанции D_{ij} по времени, причем если суда сближаются, то $\delta_{ij} = 1$, если удаляются - $\delta_{ij} = -1$, а если суда являются спутниками, то $\delta_{ij} = 0$. Поэтому δ_{ij} может принимать только три значения и справедливо соотношение:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } \dot{D}_{ij} > 0; \\ 0, & \text{при } \dot{D}_{ij} = 0; \\ -1, & \text{при } \dot{D}_{ij} < 0; \end{cases}$$

Как показано в работах [2,4], возможность изменять относительный курс пары сближающихся судов зависит от соотношения их скоростей $\rho_{ij} = \frac{V_i}{V_j}$. Если скорость оперирующего судна V_i превосходит скорость цели V_j , то оперирующее судно может реализовать любое значение относительного курса. Если же имеет место неравенство $\rho_{ij} \leq 1$, то оперирующее судно c_i может изменять относительный курс на величину $\Delta K_{otij} = 2 \arcsin \rho_{ij}$.

Следовательно, в качестве характеристики системы Σ_n необходимо использовать матрицу P , элементом которой является ρ_{ij} .

Таким образом, управляемую динамическую систему Σ_n характеризуют матрицы D , A , K_{ot} , V_{ot} , Δ и P .

Следует отметить, что для судов системы Σ_n , у которых $\delta_{ij} = 1$, т.е. они сближаются, может возникать угроза столкновения. Поэтому для оценки уровня безопасного функционирования системы Σ_n , т.е. возможного столкновения ее судов, необходимо ввести соответствующую характеристику.

Очевидно, что такая характеристика должна отражать вероятность возможного столкновения каждой пары сближающихся судов, поэтому в качестве такой характеристики целесообразно использовать матрицу оценки безопасности системы, которую обозначим P_d . Элементом этой матрицы является вероятность p_{dij} столкновения пары сближающихся судов. Рассматриваемая матрица является симметричной ($p_{dij} = p_{dji}$) с нулевой диагональю. С помощью матрицы оценки безопасности системы P_d можно выразить интегральные оценки безопасности системы Σ_n : вероятность возникновения столкновения в системе P_c или среднее значение возможных столкновений N_c за определенный интервал времени. Очевидно, указанные величины являются критериями, которые определяют качество управления системы, причем вектор управления U_Σ выбирается таким образом, чтобы обеспечить минимально- допустимую величину вероятности P_c .

Если рассматривается группа судов, находящаяся вне зоны контроля и управления СУДС, то существенными являются еще и характеристики координации и взаимодействия опасно сближающихся пары судов.

В настоящее время, в ситуациях, где отсутствует внешнее управление судами, используется статусно–позиционный принцип бинарной координации пары судов, которых реализован в МППСС-72 в части маневрирования судов на виду друг у друга для предупреждения столкновения. Упомянутый принцип в общем случае определяет взаимно согласованный маневр, в котором опасно сближающимся судам предписываются определенные типы поведения, предусматривающие одно из судов предпринимать маневр для расхождения (активное судно) и пассивное судно, сохраняющее свои параметры движения. Существуют ситуации, когда оба судна обязаны быть активными. При этом активному судну предписывается разрешенная область изменения курсов. Например, для судов опасно сближающихся на противоположных курсах предписывается изменение курса каждого из судов вправо.

Поэтому для характеристики предупреждения опасных состояний системы следует рассмотреть координационную матрицу системы C_{Σ} , а по ее значению определить матрицу взаимодействия судов B_{Σ} .

Координационная матрица C_{Σ} определяется принципом координации, а ее элементом $c_{\Sigma ij}$ является характеристика активности судна при расхождении, причем $c_{\Sigma ij}$ может принимать значения 1, 0 или -1 в зависимости от принадлежности оперирующего судна c_i к подмножеству активных $M_{\Sigma a}$, пассивных $M_{\Sigma p}$ или нейтральных $M_{\Sigma n}$ судов системы согласно следующему соотношению:

$$c_{\Sigma ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } c_i \in M_{\Sigma a}; \\ 0, & \text{при } c_i \in M_{\Sigma n}; \\ -1, & \text{при } c_i \in M_{\Sigma p}; \end{cases}$$

Нейтральным судном называется судно, которому согласно принципу координации, например МППСС-72, не предписывается определенного поведения. Так, это имеет место для судов одного статуса, кроме судов с механическим двигателем и парусных судов или в случае, когда пассивное судно при бездействии активного может предпринимать действия по предупреждению столкновения.

Требование определенной стороны уклонения судна можно формализовать матрицей стороны уклонения C_{α} , элемент которой $c_{\alpha ij}$ может принимать значения 0 для пассивного судна, 1 при требовании уклонения вправо, 2 при уклонении влево, 3 при возможности уклонения в любую сторону и 4 при требовании избегать пересечения курса партнера по носу.

Матрицы C_{Σ} и C_{α} во многом определяют типы взаимодействия пар судов в процессе расхождения, которые целесообразно формализовать с помощью матрицы взаимодействия судов V_{Σ} . Этот вопрос предстоит исследовать в дальнейшем.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В работе предложены характеристики управляемой динамической системы Σ_n , и показаны пути их формализации для аналитического описания процесса взаимодействия судов при расхождении и управления процессом расхождения. В дальнейшем необходимо произвести исследование систем взаимодействующих судов с позиций их координации и возможных типов взаимодействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальцев А. С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
2. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Цымбал Н.Н., Бурмака И.А., Тюпиков Е.Е. – Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
3. Бинай Кумар Синх. Области взаимных обязанностей судов / Бинай Кумар Синх // Судовождение. - 2000. - № 2. - С. 121 – 125.
4. Заичко С.И. Управление взаимодействием судов в ситуации опасного сближения / Заичко С.И., Пятаков Э.Н. // Судовождение: Сб. научн. трудов. / ОНМА, – Вып.11. - Одесса: „ИздатИнформ”, 2006. – С. 56 – 60.
5. Цымбал Н.Н. Учет ограничений МППСС-72 при выборе маневра расхождения судов/Цымбал Н.Н., Бужбецкий Р.Ю. // Судовождение. – 2006. - № 11. – С. 134 – 138.