

Определение структуры маневра экстренного расхождения

Е. П. Чапчай, А. И. Бурмака

Национальный Университет «Одесская Морская Академия», Одесса, Украина
Corresponding author. E-mail: burmaka-mob@ukr.net

Paper received 08.12.17; Revised 13.12.17; Accepted for publication 15.12.17.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2017-148V16-17>

Аннотация. Рассмотрена стратегия маневрирования судна для предупреждения столкновения с целью в ситуации чрезмерного сближения. Показано, что структура стратегии расхождения зависит от текущей относительной позиции судна и цели, а также их параметров движения. Маневр расхождения может содержать от двух до пяти этапов. Получены условия реализации каждого из этапов и приведены аналитические выражения расчета его параметров.

Ключевые слова: безопасность судоходства, предупреждение столкновения судов, стратегия экстренного расхождения, чрезмерное сближение судов.

Введение. При плавании в стесненных водах возрастает риск столкновения судов из-за повышенной интенсивности их движения и ограниченного пространства для маневра, что нередко ведет к возникновению ситуации чрезмерного сближения с угрозой столкновения. Развитие таких ситуаций зачастую заканчиваются столкновением судов. В ситуациях чрезмерного сближения МППСС-72 обязывают оба судна предпринимать все возможные меры, обеспечивающие безопасное расхождение. В таких ситуациях оба судна принимают решения по безопасному расхождению в условиях неопределенности относительно предстоящих действий партнера. Поэтому безопасный исход в таких ситуациях в большей мере определяется не рациональным принятием решения, а интуицией капитана и везением.

Краткий обзор публикаций по теме. Совершенствованию способов выявления ситуации опасного сближения и предупреждению возможного столкновения посвящены работы [1-4]. В работе [1] разработан метод синтеза гибких стратегий расхождения, согласно которому структура стратегии расхождения зависит от значения ситуационного возмущения. В работе [2] показана зависимость типов взаимодействия судов при возникновении ситуационных возмущений от степени опасности столкновения. В работе [3] рассмотрена проблема разработки оптимальной структуры системы бинарной координации взаимодействия пары судов в ситуации опасного сближения, причем согласованность маневров судов предпочтительно оценивать скоростью изменения дистанции кратчайшего сближения.

Описание процесса расхождения судов методами дифференциальных игр предложено в работах [4-6], а также отмечается сложность задачи выбора оптимального маневра расхождения, как многомерного процесса управления движением судна, отличающегося нелинейными и нестационарными характеристиками.

В работе [7] излагается теоретическое обоснование автономной судовой системы предупреждения столкновения судов (Collision avoidance). Также рассматриваются требования к автономной навигации. Указывается, что исследования по автоматизации управления судном, которые проводятся в настоящее время, могут быть представлены в классической или компьютерной категориях. Классические подходы основаны на математических моделях и алгоритмах, а компьютерные технологии используют искусственный интеллект (Artificial Intelligence). Работа носит теоретический характер и не содержит рекомендаций практическому судоходству. В работе [8] представлены исследования по проблеме обеспечения безопасного расхождения судов методами

внешнего управления с использованием недопустимых областей курсов или скоростей судов.

Цель. Целью настоящей статьи является рассмотрение структуры маневра экстренного расхождения и выявление факторов влияющих на нее.

Материалы и методы. Согласно правилу 17 МППСС-72 в ситуациях чрезмерного сближения оба судна обязаны предпринять меры для безопасного расхождения. В таких ситуациях оба судна принимают решения в условиях неопределенности относительно предстоящих действий партнера, что обуславливает целесообразность использования минимаксных стратегий расхождения. В данной статье при рассмотрении маневра расхождения в ситуации чрезмерного сближения исследуется не только уклонение судна от опасной цели при ее непредсказуемом поведении, а и изменение курса судна до момента выхода на программную траекторию движения.

Как показано в работе [8], в нулевой момент времени (момент обнаружения ситуации чрезмерного сближения) судно, следуя минимаксной стратегии, которая предполагает наиболее неблагоприятный маневр уклонения цели, должно лечь на курс K_0 , равный обратному пеленгу на цель, т.е. $K_0 = \alpha + 180$, где α - пеленг на цель. При этом поворот на указанный курс производится в сторону от направления на цель с максимальной угловой скоростью. Данный этап стратегии расхождения, который можно назвать уклонением от цели, предназначен для обеспечения максимального значения скорости изменения дистанции между судном и целью. В данной статье будем полагать, что скорость цели V_c превосходит скорость судна V_0 , т.е. $V_c > V_0$. На данном этапе необходимо избежать ситуации чрезмерного сближения, изменяя позицию судна относительно цели так, чтобы судно оказалось в ситуации, обеспечивающей безопасное сближение и движение судна к программной траектории движения.

Таким образом, после поворота на курс K_0 , когда максимально возможная дистанция кратчайшего сближения $\max L_{\min}$ не превосходит предельно-допустимую дистанцию L_d , т.е. $\max L_{\min} \leq L_d$, судно следует курсом $K_0 = \alpha + 180$, причем этот курс изменяется с изменением пеленга α , так как происходит перемещение цели относительно судна. Так как скорость судна меньше скорости цели $V_c > V_0$, то при изменении курса судна на 360° относительный курс изменяется лишь в некотором секторе, достигая максимального и минимального значений, величина которых определяется выражениями [1]:

$$K_{otmin} = \pi + K_c - \arcsin \rho \text{ И } K_{otmax} = \pi + K_c + \arcsin \rho, (1)$$

где K_{otmin} и K_{otmax} - соответственно минимальное и максимальное значения относительного курса;

K_c - курс цели;

$\rho = V_o / V_c$, причем в рассматриваемом случае $\rho < 1$.

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

Очевидно, если скорость судна меньше скорости цели, то максимально возможная дистанция кратчайшего сближения $\max L_{min}$ достигается при относительных курсах K_{otmin} или K_{otmax} . Если через K_{extr} обозначить экстремальный относительный курс (K_{otmin} или K_{otmax}), на котором дистанция кратчайшего сближения L_{min} максимальна, то при условии, что цель не изменяет параметры движения, выражение для $\max L_{min}$ имеет следующий вид [1]:

$$\max L_{min} = D \sin(K_{extr} - \alpha), (2)$$

где α , D - соответственно пеленг на цель и дистанция между судном и целью.

Так как с момента времени начала отворота судна от начального программного курса пеленг α и дистанция D изменяются, то в момент времени t_{on} достижения курса судна значения курса «убегания» K_o необходимо оценить текущую относительную позицию. Для этого следует с помощью формулы (1) рассчитать экстремальные относительные курсы и вычислить максимально возможную дистанцию кратчайшего сближения $\max L_{min}$ по формуле (2). Затем надлежит проверить справедливость неравенства $\max L_{min} \leq L_d$. При истинности неравенства надлежит следовать курсом «убегания» K_o , удерживая курс судна противоположным пеленгу на цель, стараясь увеличить дистанцию до цели. При этом необходимо контролировать соотношение $\max L_{min} \leq L_d$. При справедливости данного неравенства судно продолжает следовать курсом K_o до тех пор, пока максимально возможная дистанция кратчайшего сближения $\max L_{min}$ не станет равной дистанции кратчайшего сближения L_d , т. е. $\max L_{min} = L_d$. Момент времени этого события обозначим t_{ok} . В данный момент времени необходимо изменить курс судна на величину, при которой достигается экстремальное значение относительного курса и максимальное значение дистанции кратчайшего сближения. Как показано в работе [8], экстремальные относительные курсы K_{otmin} и K_{otmax} достигаются соответственно при курсах судна:

$$K_{omin} = K_c + \arccos(\rho) \text{ и } K_{omax} = K_c - \arccos(\rho).$$

Следуя одним из указанных курсов, судно перемещается в сторону цели, причем дистанция D между судном и целью сокращается, достигая в момент времени t_b значения предельно-допустимой дистанции L_d . Начиная с этого момента времени, дистанция D увеличивается и судно ложится на курс выхода на программ-

ную траекторию K_b , причем участок выхода на программную траекторию движения судна расположен под углом $\gamma = 30^\circ - 40^\circ$ к программной траектории, т. е. $K_b = K_n \pm \gamma$, где K_n - начальный курс судна. Судно следует курсом выхода K_b до тех пор, пока не достигнет программной траектории, после чего ложится на начальный курс K_n , перемещаясь по программной траектории.

Если в момент времени t_{on} достижения курса судна значения курса «убегания» K_o имеет место неравенство $\max L_{min} \geq L_d$, то необходимо проверить возможность выхода судна на программную траекторию курсом K_b , для чего надлежит произвести контроль изменения дистанции при следовании этим курсом. Если дистанция увеличивается, то судно может выходить на заданную траекторию. В противном случае при уменьшении дистанции необходимо рассчитать дистанцию кратчайшего сближения L_{minb} при следовании курсом K_b с позиции в момент времени t_{on} . Если справедливо неравенство $L_{minb} \geq L_d$, то судно реализует участок выхода судна на программную траекторию. Если же неравенство не выполняется, то следует рассчитать курс уклонения K_y , при котором дистанция кратчайшего сближения L_{min} равна предельно-допустимой дистанции L_d , т. е. $L_{min} = L_d$. В этом случае [1], значение курс уклонения K_y рассчитывается по формуле:

$$K_y = K_{oty} + \arcsin[\rho^{-1} \sin(K_c - K_{oty})],$$

где K_{oty} - относительный курс уклонения, который определяется из выражения:

$$K_{oty} = \alpha_y + \arcsin\left(\frac{L_d}{D_y}\right),$$

здесь α_y и D_y - соответственно пеленг и дистанция в момент времени t_{on} .

Результаты и их обсуждение. Подводя итоги, определим структуру стратегии экстренного расхождения с учетом поведения цели в процессе расхождения в случае, когда скорость судна меньше скорости цели. Первым этапом стратегии экстренного расхождения является выход в позицию минимизации скорости сближения. Этот этап длится с начального момента обнаружения ситуации чрезмерного сближения до выхода судна на курс минимизации скорости сближения, равный обратному пеленгу на цель. Параметрами первого этапа являются сторона поворота судна, конечный курс переходного процесса, линейная скорость судна и угловая скорость поворота. Вторым этапом является движение судна курсом минимизации скорости сближения до выхода в позицию начала целесообразного движения по выполнению функционального назначения в сторону программной траектории. С этой позиции в зависимости от маневрирования цели движение судна возможно различными курсами: либо экстремальным курсом $K_{extr} = (K_{omax}, K_{omin})$, либо курсом уклонения K_y , либо курсом выхода K_b . Поэтому будем различать следующие этапы движения судна к программной траектории движения: третий этап движения экстремальным курсом, четвертый этап движения курсом уклонения и

пятый этап выхода на программную траекторию движения.

Структура стратегии экстренного расхождения представляет собой последовательность этапов движения с момента идентификации ситуации чрезмерного сближения до момента возвращения судна на программную траекторию движения. Анализ вышеизложенного показывает, что первый и пятый этапы обязательно содержатся во всех типах структуры стратегии экстренного расхождения. В общем случае возможны четыре типа структуры S_i стратегии экстренного расхождения с различным набором этапов G_j , которые приведены в табл.

1. Первый этап G_1 соответствует переходному процессу

Типы структуры экстренной стратегии S	Последовательность этапов G
S_1	{ G_1, G_2, G_3, G_4, G_5 }
S_2	{ G_1, G_3, G_4, G_5 }
S_3	{ G_1, G_4, G_5 }
S_4	{ G_1, G_5 }

Выводы. 1. Рассмотрена стратегия экстренного маневрирования судна для предупреждения столкновения с целью в ситуации чрезмерного сближения.

2. Показано, что структура стратегии расхождения зависит от текущей относительной позиции судна и цели,

с начального курса до выхода судна на курс равный $K_\alpha = \alpha + 180$. Второй этап экстренного уклонения G_2 предусматривает следование судна курсом K_α до окончания этапа. Очередной третий этап экстремального уклонения G_3 обеспечивает следование судна экстремальными курсами при сближении с целью на встречаемых курсах. Этап стандартного уклонения G_4 (четвертый) предусматривает сближение с целью на кратчайшую дистанцию, равную предельно-допустимой L_d . И, наконец, пятый этап G_5 , этап выхода на заданную траекторию завершает стратегию расхождения.

а также их параметров движения. Маневр расхождения может содержать от двух до пяти этапов.

3. Получены условия реализации каждого из этапов стратегии и приведены аналитические выражения расчета его параметров.

ЛИТЕРАТУРА

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. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбетский Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. - Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
3. A. Volkov. Appraisal of the Coordinability of the Vessels for Collision Avoidance Maneuvers by Course Alternation / A. Volkov, E. Pyatarov & A. Yakushev// Activites in Navigation.-Adam Weintrit/ - 2015, P. 195 – 200.
4. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation/ Lisowski J. // Advances in Safety and Reliability. – 2005. - Vol. 2. - London-Singapore, Balkema Publishers. – P. 1285-1292.
5. Lisowski J. Game and computational intelligence decision making algorithms for avoiding collision at sea/ Lisowski J. // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Technologies for Homeland Security and Safety. - 2005. – Gdańsk. – P. 71-78.
6. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system/ Lisowski J. // The Archives of Transport. - 2005. - No 3-4, Vol. XVII. – P. 133-147.
7. Statheros Thomas. Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques / Statheros Thomas, Howells Gareth, McDonald-Maier Klaus. // J. Navig. 2008. 61, № 1, p. 129-142.
8. Бурмака И.А. Управление судами в ситуации опасного сближения / И.А. Бурмака., Э.Н. Пятаков., А.Ю. Булгаков - LAP LAMBERT Academic Publishing, - Саарбрюккен (Германия), – 2016. - 585 с.

REFERENCES

1. Tsymbal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsymbal, I. Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.
2. Pyatakov E. Cooperation of vessels at divergence for warning of collision / Pyatakov E., Buzhbetskiy R., Burmaka I., Bulgakov A., Kherson: Grin D.S., 2015. - 312 p.
8. Burmaka I. Management by vessels in the situation of dangerous rapprochement / Burmaka I., Pyatakov E., Bulgakov A.- LAP LAMBERT Academic Publishing, - Saarbrücken (Germany), – 2016. - 585 p.

Определение структуры маневра экстренного расхождения

Е. П. Чапчай, А. И. Бурмака

Аннотация. Рассмотрена стратегия маневрирования судна для предупреждения столкновения с целью в ситуации чрезмерного сближения. Показано, что структура стратегии расхождения зависит от текущей относительной позиции судна и цели, а также их параметров движения. Маневр расхождения может содержать от двух до пяти этапов. Получены условия реализации каждого из этапов и приведены аналитические выражения расчета его параметров.

Ключевые слова: безопасность судоходства, предупреждение столкновения судов, стратегия экстренного расхождения, чрезмерное сближение судов.

Determination of the structure of the emergency discrepancy manoeuvre

E. P. Chapchay, A. I. Burmaka

Abstract. The strategy of ship manoeuvring is considered to prevent a collision with the situation in the situation of excessive convergence. It is shown that the article of the strategy of passing depends on the current relative position and purpose, as well as their movement parameters. The passing manoeuvre can contain from two to five stages. Terms of realization of each stage and final analytical parameters of its parameters are received.

Keywords: safety of navigation, prevention of collision of ships, strategy of emergency discrepancy, excessive convergence of ships.