

Раздел 1 ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА СУДОВОЖДЕНИЕ, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.61.052.4

DOI: 10.34046/aumsuomt105/2

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОБЛАСТИ ВОЗМОЖНОГО СТОЛКНОВЕНИЯ СУДОВ НА ОСНОВЕ МНОЖЕСТВ ДОСТИЖИМОСТИ

А.С. Жук, кандидат технических наук

Рассматривается метод построения области возможного столкновения судов в задаче гарантированного предотвращения столкновений управляемого судна с судами-целями, движущимися непредсказуемо. Множество достижимости дополняется заданной безопасной дистанцией, участки расширенного множества сопрягаются и формируют границу множества возможных столкновений в удобном для практического применения виде. Выполненные исследования способствуют совершенствованию методов управления судном.

Ключевые слова: область возможных столкновений, множество достижимости, предотвращение столкновений судов.

METHOD OF POSSIBLE SHIPS COLLISION AREA CONSTRUCTING ON REACHABLE SETS BASIS

A.S. Zhuk

The article has considered the method of vessels possible collision area constructing in problem of guaranteed collision avoidance of controlled vessel with unpredictable target-vessels. Reachable set is expanded with defined safe distance, segments of enlarged set combine and form possible collision area, which is convenient for practical use. Performed researches contribute to the improvement of the ship's handling methods.

Keywords: possible collision area, reachable set, vessels collision avoidance.

Введение. Предупреждение столкновений – важная, актуальная и зачастую критическая задача для судоводителя как в современных условиях управления судном, так и в свете активно развивающейся концепции автономных безэкипажных судов. В настоящей работе предлагается новый подход к задаче гарантированного предотвращения столкновений судов в отношении судов-целей с динамическими ограничениями, но обладающими непредсказуемостью движения. В современных системах автоматической радиолокационной прокладки (САРП) широко используются расчеты параметров движения цели для выбора маневра для предотвращения столкновения, основанном на предположении, что параметры движения судна-цели известны и прогнозируемы во времени. Однако, в реальных условиях маневрирования прогнозируемое движение судна-цели обычно можно считать достоверным только на коротком промежутке времени. Для обеспечения безопасности плавания на больших горизонтах программирования движения управляемого судна предлагается метод, основанный на множествах достижимости судна-цели [1, 3, 4, 7 – 9, 12, 14, 15, 17]. Модель динамики судна-цели в задаче

предотвращения столкновений можно приближенно описать моделью с известной постоянной линейной скоростью и известной максимальной угловой скоростью судна, подобные модели называются моделями Дубинса (Dubins car model) [3, 4, 14, 17].

Исходные данные. В общем случае обеспечение безопасности плавания можно описать как определение пространства безопасных состояний и ограничений на управление, обеспечивающих движение судна только в пределах такого пространства. Безопасными состояниями будем называть такие состояния, которые не нарушают ограничения, связанные с предупреждением столкновений, и в то же время обеспечивают переход судна в другое безопасное состояние. Например, снижение скорости вплоть до полной остановки с последующей отдачей якоря можно считать достижением инвариантного безопасного состояния на бесконечном интервале времени, таким образом, любое состояние, из которого возможна отдача якоря, можно считать безопасным. Однако, в реальной непредсказуемой навигационной обстановке гораздо сложнее определить достаточные условия безопасного состояния, так

как даже для судна, стоящего на якоре существует вероятность столкновения с судами на ходу, либо судно может оказаться в окружении такого множества других судов, движущихся таким образом, что столкновение окажется неминуемым.

Другой распространенный подход к предотвращению столкновений предполагает возможность точно определить опасность столкновения, чтобы своевременно предпринять маневр в соответствии с динамическими возможностями управляемого судна. Однако, такой подход обладает существенными недостатками в реальной непредсказуемой навигационной обстановке с участием множества судов, для которых невозможно прогнозировать развитие ситуации, когда сначала движение судна-цели не представляет непосредственной опасности, но в конечном счете столкновение оказывается неизбежным, как в случае окружения множеством судов-целей. Кроме того, такие ситуации не формализованы с точки зрения Международных правил предотвращения столкновений судов (МППСС), которые сформулированы для расхождения только лишь двух судов.

В ситуациях с большим запасом времени и значительной непредсказуемостью движения точное и одновременное программирование маневра целиком может оказаться невыполнимым. Вместо этого программирование в реальном времени способно обеспечить приспособляемость управления по мере доступности новой информации. Многофакторность таких задач не позволяет гарантировать движение строго в рамках предварительной прокладки или заданной полосы движения. Вместо этого можно использовать последовательные построения областей возможных столкновений судов, чтобы обеспечить безопасность плавания и в то же время минимизировать отклонения от предварительного плана перехода судна.

В настоящей работе рассматривается метод определения границ множеств достижимости судов-целей, который гарантирует безопасность плавания в навигационной обстановке многочисленных судов с динамическими ограничениями, но движущихся непредсказуемо. Такие случаи до сих пор остаются недостаточно исследованными. Безопасность судовождения достигается использованием множеств достижимости как функции времени для судов-целей с учетом их динамических возможностей.

Постановка задачи. Цель управления состоит в безопасном маневрировании судна в навигационной обстановке с множеством потенциально опасных судов-целей. Каждое судно-цель

обладает постоянной линейной скоростью и может развивать угловую скорость до некоторого максимального значения. Уравнения динамики (1) судов-целей записаны в виде модели Дубинса [3, 4, 14, 17].

$$\dot{\vec{x}} = V[\sin K \quad \cos K]^T; \quad |\dot{K}| \leq \omega_{\max}; \quad \dot{V} = 0, \quad (1)$$

где \vec{x} – вектор координат судна в прямоугольной системе координат, связанной с меридианом и параллелью; V – линейная скорость судна; K – курс судна в полукруговом счете; ω_{\max} – максимальная угловая скорость судна.

В некоторых случаях, например, при планировании маршрута на карте удобно использовать запись вида

$$R_{\min} = \frac{V}{\omega_{\max}}, \quad (2)$$

где R_{\min} – минимальный радиус поворота.

Управляемое судно может описываться различными моделями динамики. Все суда считаем точечными объектами. Зоной навигационной безопасности считаем круг заданного радиуса $R_{\text{ЗНБ}}$. При этом ситуация опасного сближения возникает, когда дистанция между судами меньше заданной минимальной безопасной дистанции, равной $R_{\text{ЗНБ}}$. Задача управления включает в себя предотвращение ситуаций опасного сближения, измеряя только лишь координаты и курсы судов-целей, при этом не обладая никакой другой дополнительной информацией. При этом управляемое судно должно выполнять предварительный план перехода настолько это возможно, но обязательно без риска столкновений.

Важным преимуществом предлагаемого подхода является возможность обеспечения безопасности плавания на бесконечном горизонте программирования движения управляемого судна и в условиях непредсказуемости движения судов-целей.

Зная, как будут двигаться суда-цели, можно рассчитать безопасный маневр, что реализовано в современных САРП. Однако, в реальных условиях плавания достоверно неизвестно как будут двигаться все суда-цели. В этих случаях САРП не гарантирует безопасность плавания в отношении судов-целей, движущихся непредсказуемым образом. Идея использования множеств достижимости позволяет определить условия предотвращения столкновений, которые играют главную роль в алгоритмах программирования движения управляемого судна [2, 5, 6, 8, 10, 11, 13, 16, 17].

Существуют алгоритмы, учитывающие элементы непредсказуемости движения, но связанные с ограниченностью горизонта планирования пути судна. Кроме того, увеличение степени непредсказуемости движения и числа судов-целей часто приводит к ситуации, когда все достижимое пространство состояний оказывается потенциально опасным. Можно использовать разные количественные показатели для выбора наиболее безопасного маневра, используя вероятностный подход, но такие методы не позволяют получить условия гарантированной безопасности плавания.

Существует другой подход, основанный на использовании безопасных состояний. Уравнения динамики управляемого судна и судов-целей позволяют определить оптимальный интервал времени, на котором не возникает состояний неминуемого столкновения. Во-первых, такой метод по-прежнему требует предсказуемости движения судов-целей по крайней мере в пределах некоторого конечного отрезка времени, но такая информация не всегда доступна в общем случае. Во-вторых, должен обеспечиваться достаточный запас времени для коррекции управления и предупреждения столкновения. Управления, предотвращающие столкновение с одним судном-целью, могут приводить к опасным сближениям с другими судами-целями, т.е. движение, удовлетворяющее оптимальному интервалу времени одного судна-цели, может приводить к столкновению с другим судном-целью. Таким образом, метод не может гарантированно обеспечить безопасность на неограниченном горизонте планирования пути.

Можно рассчитать необходимые изменения курса и скорости управляемого судна для предотвращения столкновения с судами-целями, которые сохраняют свой курс и скорость. Однако, вероятно проблема, рассмотренная выше, выполнимость таких маневров гарантирована только для случая единственного судна-цели; множественные суда-цели накладывают ограничения, которые могут быть не удовлетворены одновременно. Задача расхождения с множественными судами-целями не может быть решена только с помощью определения конфигурации множества судов-целей, так как суда-цели движутся независимо друг от друга.

Другие подходы, в которых безопасные траектории удовлетворяют динамическим ограничениям управляемого судна и судов-целей, применимы только на ограниченных горизонтах планирования пути с заданными конечными точками траекторий и без условий безопасности последующего движения. Таким образом, алгоритм

не может на практике реализовать программное движение на больших горизонтах программирования движения.

Гарантированное безопасное движение достигается в мульти-агентных системах, в которых все суда придерживаются одной стратегии предотвращения столкновений. Такие структуры основаны на координирующем управлении над всеми судами в навигационной обстановке, и таким образом, не могут управлять внешними судами-целями, движущимися непредсказуемо и независимо.

Настоящая работа предлагает метод решения задачи гарантированного предотвращения столкновений судов на неограниченном горизонте программирования движения управляемого судна в условиях непредсказуемости движения других судов. Метод основан на построении множеств достижимости судов-целей, которые в дальнейшем используются для определения гарантированно безопасных состояний управляемого судна.

Множества достижимости. Областью возможного столкновения будем называть область физического водного пространства, в которой возможно столкновение с заданным судном-целью, как функция времени. Например, если координаты судна-цели известны в некоторый будущий момент времени, то границей области возможного столкновения в этот момент времени будем считать окружность с центром с координатами судна-цели радиуса равного заданному навигационному запасу $R_{знь}$.

Если невозможно определить точно координаты судна-цели как функцию времени, то для определения областей возможных столкновений могут быть использованы области достижимости. Областью достижимости здесь будем называть совокупность всех возможных позиций судна-цели в заданный момент времени. Предотвращая контакт целиком с областью достижимости судна-цели, управляемое судно предотвращает любое возможное столкновение с судном-целью.

Считаем, что судно-цель движется с постоянной скоростью в плоскости водного пространства. Судно-цель в начальный момент времени движется курсом θ^0 в точке с нулевыми маршрутными координатами. Динамика судна-цели описывается моделью с известной постоянной линейной скоростью и известной максимальной угловой скоростью судна, подобные модели называются моделями Дубинса. Тогда уравнения динамики судна-цели имеют вид (1).

На основе [3, 4, 17] границы области достижимости модели (1) в момент времени t определяются четырьмя кривыми, заданными в параметрической форме.

Дальнюю границу множества достижимости можно описать уравнениями

Если $-\omega_{\max} t \leq K \leq 0$, то

$$\begin{aligned} X_{FP}(K, t) &= -R_{\min}(1 - \cos K) + (Vt + KR_{\min}) \sin K; \\ Y_{FP}(K, t) &= -R_{\min} \sin K + (Vt + KR_{\min}) \cos K. \end{aligned} \quad (3)$$

Если $0 \leq K \leq \omega_{\max} t$, то

$$\begin{aligned} X_{FS}(K, t) &= R_{\min}(1 - \cos K) + (Vt - KR_{\min}) \sin K; \\ Y_{FS}(K, t) &= R_{\min} \sin K + (Vt - KR_{\min}) \cos K. \end{aligned} \quad (4)$$

где $X_{FP}, Y_{FP}, X_{FS}, Y_{FS}$ – маршрутные координаты левого и правого участков дальней границы множества достижимости, соответственно; t – время.

Точки дальней границы множества достижимости соответствуют траекториям с оптимальным быстродействием. Управления, ведущие на дальнюю границу, содержат не более одного переключения. Движение начинается поворотом с

максимальной угловой скоростью, затем – переключается на прямолинейное движения. На дальнюю границу множества так же ведут управления без переключений, т.е. постоянный поворот и постоянное прямолинейное движение.

Ближняя граница множества достижимости описывается уравнениями

Если $-p' \leq p \leq 0$, то

$$\begin{aligned} X_{BP}(p, t) &= -R_{\min}(2 \cos p - 1 - \cos(2p - \omega_{\max} t)); \\ Y_{BP}(p, t) &= R_{\min}(2 \sin p - \sin(2p - \omega_{\max} t)). \end{aligned} \quad (5)$$

Если $0 \leq p \leq p'$, то

$$\begin{aligned} X_{BS}(p, t) &= R_{\min}(2 \cos p - 1 - \cos(2p - \omega_{\max} t)); \\ Y_{BS}(p, t) &= R_{\min}(2 \sin p - \sin(2p - \omega_{\max} t)). \end{aligned} \quad (6)$$

где $X_{BP}, Y_{BP}, X_{BS}, Y_{BS}$ – маршрутные координаты левого и правого участков ближней границы множества достижимости, соответственно; p – параметр; p' – значение параметра, определяемое решением уравнения

$$2 \cos p' - 1 - \cos(2p' - \omega_{\max} t) = 0. \quad (7)$$

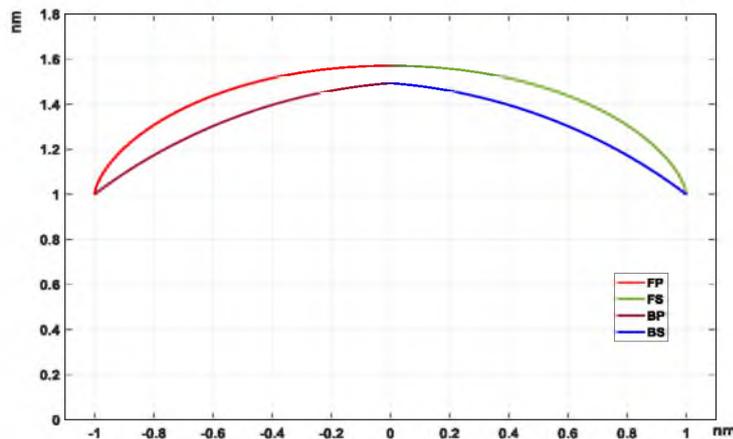


Рисунок 1 – Граница множества достижимости судна-цели. $V=10$ уз, $\omega=9,5$ °/мин, $t=0.5\pi/\omega \approx 9.4$ мин

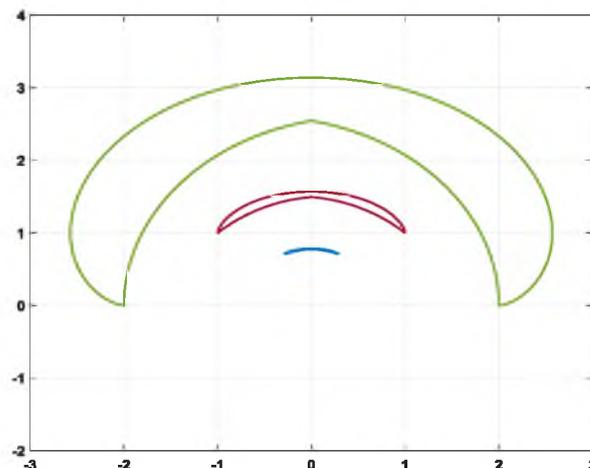


Рисунок 2 – Развитие множества достижимости. $t=0.25\pi/\omega$, $t=0.5\pi/\omega$, $t=\pi/\omega$

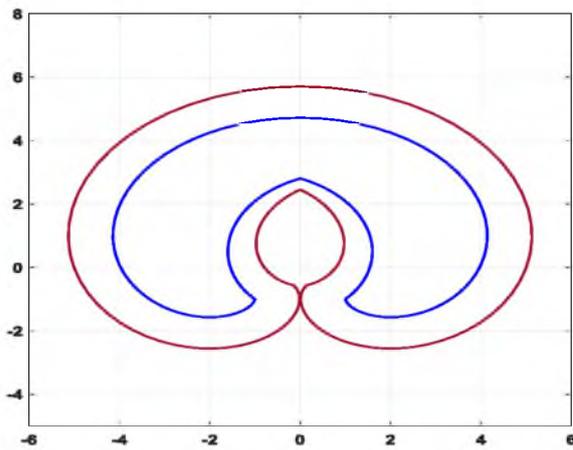


Рисунок 3 – Развитие множества достижимости. $t=1.5\pi/\omega$, $t=1.8\pi/\omega$

Точки, принадлежащие ближней границе множества достижимости, соответствуют управлениям с одним переключением. Движение начинается поворотом с максимальной угловой скоростью, затем – переключается на поворот с максимальной угловой скоростью в сторону противоположного борта.

Для заданных начальных позиции и курса судна-цели, динамика которого описывается уравнениями (1), позиция судна-цели в любой заданный момент времени находится в пределах границ, определяемых уравнениями (3) – (7).

На рисунке 1 представлено множество достижимости $MД(t)$ судна-цели, движущегося с постоянной линейной скоростью $V=10\text{уз}$ и максимальной угловой скоростью $\omega_{max}=9,5\text{ }^\circ/\text{мин}$, для момента времени $t=0.5\pi/\omega \approx 9.4\text{ мин}$, соответствующего максимальному повороту на 90° .

На рисунках 1, 2 представлено развитие множества достижимости для моментов времени $t=0.25\pi/\omega$, $t=0.5\pi/\omega$, $t=\pi/\omega$, $t=1.5\pi/\omega$, $t=1.8\pi/\omega$. После момента времени $t=1.8\pi/\omega$ у области достижимости образуется внутренний контур, который в дальнейшем быстро «затягивается».

Области возможных столкновений.

Уравнения (3) – (7) описывают возможные положения судна-цели в заданные моменты времени. Каждую точку границ этого множества заменим окружностью радиуса $R_{ЗНБ}$, определяемого судоводителем, исходя из соображений безопасности плавания в условиях текущей навигационной обстановки. Величина $R_{ЗНБ}$ зависит от условий плавания, стесненности акватории, интенсивности судопотока, размеров управляемого судна и судна-цели и множества других факторов.

Для упрощения представления различных участков, составляющих область столкновений, ближняя граница заменяется прямолинейным участком, соединяющим крайние точки дальней границы множества достижимости судна-цели. Таким образом, получим новое расширенное множество, которое включает в себя исходное множество достижимости. Затем расширим новое множество, заменив точки его границ на окружности радиуса $R_{ЗНБ}$. Такое множество будем называть областью возможных столкновений в заданный момент времени t и обозначать $ОВС(t)$.

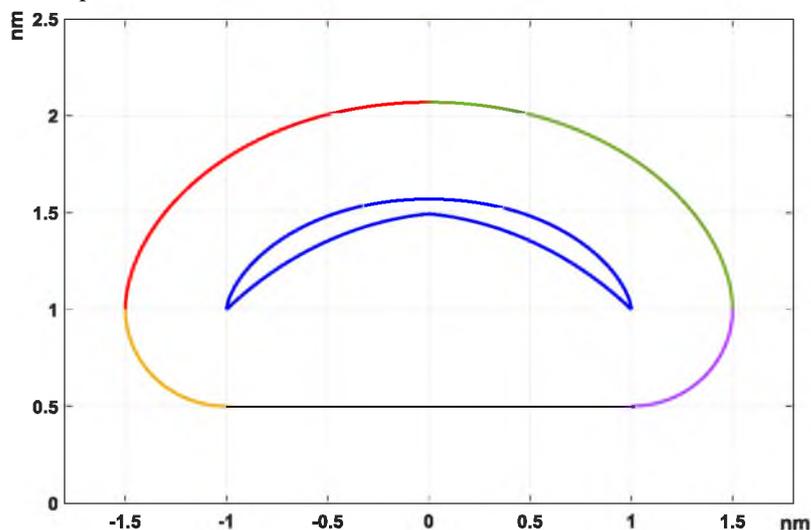


Рисунок 4 – Область возможных столкновений. $V=10\text{уз}$, $\omega=9,5\text{ }^\circ/\text{мин}$, $t=0.5\pi/\omega \approx 9.4\text{ мин}$, $R_{ЗНБ} = 0.5\text{ м.мили}$

Граница $OBC(t)$ в заданный момент времени содержит до пяти возможных частей. Четыре из них задаются в параметрической форме в зависимости от курса K , который задается в полукруговом счете.

Уравнения дальней границы $OBC(t)$ получаются из уравнений (3), (4) добавлением радиуса $R_{ЗНБ}$.

$$\begin{aligned} \text{Если } \max(-\omega_{\max} t, -\pi) \leq K \leq 0, \quad \text{то} \\ X_1(K, t) = -R_{\min}(1 - \cos K) + (Vt + KR_{\min} + R_{ЗНБ}) \sin K; \\ Y_1(K, t) = -R_{\min} \sin K + (Vt + KR_{\min} + R_{ЗНБ}) \cos K. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{Если } 0 \leq K \leq \min(\omega_{\max} t, \pi), \quad \text{то} \\ X_2(K, t) = R_{\min}(1 - \cos K) + (Vt - KR_{\min} + R_{ЗНБ}) \sin K; \\ Y_2(K, t) = R_{\min} \sin K + (Vt - KR_{\min} + R_{ЗНБ}) \cos K, \end{aligned} \quad (9)$$

где X_1, Y_1, X_2, Y_2 – маршрутные координаты левого и правого участков дальней границы области возможных столкновений; $R_{ЗНБ}$ – радиус зоны навигационной безопасности.

Два участка границы $OBC(t)$ представляют собой дуги окружностей радиуса $R_{ЗНБ}$, которые сопрягаются с левой (8) и правой (9) частями дальней границы $OBC(t)$. Центры этих окружностей находятся из уравнений (3), (4), соответственно. Если $|\omega t| \geq \pi$, тогда дуги окружностей вырождаются и не формируют части ОВС. Если $|\omega t| < \pi$, тогда уравнения дуг в параметрической форме имеют вид

$$\begin{aligned} \text{Если } -\pi \leq K \leq -\omega_{\max} t, \quad \text{то} \\ X_3(K, t) = -R_{\min}(1 - \cos(\omega_{\max} t)) + R_{ЗНБ} \sin K; \\ Y_3(K, t) = R_{\min} \sin(\omega_{\max} t) + R_{ЗНБ} \cos K. \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Если } \omega_{\max} t \leq K \leq \pi, \quad \text{то} \\ X_4(K, t) = R_{\min}(1 - \cos(\omega_{\max} t)) + R_{ЗНБ} \sin K; \\ Y_4(K, t) = R_{\min} \sin(\omega_{\max} t) + R_{ЗНБ} \cos K. \end{aligned} \quad (11)$$

где X_3, Y_3, X_4, Y_4 – маршрутные координаты левой и правой дуг окружностей, формирующих участки границ $OBC(t)$.

Отметим, что для $t > \pi / \omega$, дуги окружностей (10), (11) не формируют границы ОВС.

Участки (8) – (11) сопрягаются и формируют дальнюю границу области возможных столкновений $OBC^F(K, t)$, где $K \in [-\pi, \pi]$.

Наконец, горизонтальный участок, соединяющий нижние точки участков $[X_1 \ Y_1]$ и $[X_2 \ Y_2]$, либо $[X_3 \ Y_3]$ и $[X_4 \ Y_4]$, формирует ближнюю границу области возможных столкновений $OBC^B(t)$.

Пространство внутри $OBC^F(K, t)$ и $OBC^B(t)$ представляет собой область возможных столкновений $OBC(t)$ с судном-целью в заданный момент времени t .

Без ущерба для безопасности плавания множество $МД(t)$ можно заменить на $OBC(t)$, т.к. множество $OBC(t)$ включает в себя множество $МД(t)$.

Заключение. Предотвращение столкновений судов является важной и актуальной задачей в современных и перспективных системах управления. Особенности разных случаев сближения судов предполагают разные предположения и допущения, а значит, и разные алгоритмы предупреждения столкновений.

Используя предлагаемый подход, определение потенциально опасного судна-цели, для которого известны в текущий момент времени параметры движения и единственная прогнозируемая траектория, расширяется на определение множества достижимости судна-цели и области возможных столкновений. Множество достижимости в заданный момент времени для каждого судна-цели представляет собой совокупность всех состояний, соответствующих динамически выполнимым траекториям, которые возможно реализовать из текущего состояния судна-цели в заданное время. Выбор управления, которое не приводит управляемое судно в область возможных столкновений, гарантированно предотвращает столкновение даже в условиях непредсказуемости движения судна-цели. Таким образом, в условиях динамических ограничений и при известных начальных состояниях гарантированно обеспечивается безопасность судовождения в каждый определенный момент времени.

Наконец, последовательные определения областей возможных столкновений позволяют последовательно анализировать окружающую навигационную обстановку. Безопасность маневрирования так же зависит от стесненности акватории и динамических ограничений самого управляемого судна.

Литература

1. Беликов С.А. Исследования по множествам достижимости управляемых систем: дисс. ... канд. физико-математических наук: 01.01.09. - 2006. - 131 с.
2. Жук А.С. Модель движения судна по программе выхода в путевую точку / А.С. Жук // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 6. – С. 32–36.
3. Жук А.С. Модель трехмерного множества достижимости движения судна / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. – 2017. – № 2 (83). – С. 51 – 57.

4. Жук А.С. Трёхмерные множества достижимости и притяжения судна с ограниченным управлением / А.С. Жук // Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – № 2 (87). – С. 32 – 38.
5. Лазарев Ю.Н. Области достижимости при многоканальном управлении траекториями экспериментального суборбитального самолета / Ю.Н. Лазарев, Т.А. Баяндина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2002. – т. 4, № 1. – С. 138 – 143.
6. Толпегин О. А. Управление ракетами на основе расчёта областей достижимости / О. А. Толпегин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Т.14, № 1. С. 73 – 82.
7. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф.Л. Черноусько. – М.: Наука, 1988. – 319 с.
8. Шматков А.М. Оптимальное управление и оценивание движения в некоторых задачах динамики: дисс. ... д-ра физико-математических наук: 01.02.01. - 2012. – 280 с.
9. Шориков А.Ф. Методика аппроксимации области достижимости нелинейной управляемой динамической системы / А.Ф. Шориков, А.Ю. Горанов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 2. – С. 112 – 120.
10. Astrein V.V. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety / V.V. Astrein, S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012108.
11. Astrein V.V. Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system / V.V. Astrein, S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012104.
12. Hua C. Reachable set modeling and engagement analysis of exoatmospheric interceptor / C. Hua, L. Yangang, C. Lei, T. Guojin // Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – 27(6). – P. 1513 – 1526.
13. Kondratyev S.I. Human-machine system as a control shell in the implementation of mooring operations / S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan, V.V. Popov, A.E. Slitsan // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012045
14. LaValle S.M. Planning Algorithms / S.M. LaValle. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
15. Mitchell I. A. Time-Dependent Hamilton–Jacobi Formulation of Reachable Sets for Continuous Dynamic Games / Ian M. Mitchell, Alexandre M. Bayen, Claire J. Tomlin // IEEE transactions on automatic control. – 2005. – Vol. 50, No. 7. – P. 947 – 957.
16. Shima T. UAV Cooperative Decision and Control / T. Shima, S. Rasmussen. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009 – 164p.
17. Wu A. Guaranteed Avoidance of Unpredictable, Dynamically Constrained Obstacles using Velocity Obstacle Sets / A. Wu. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2011 – 116p.

References

1. Belikov S.A. Issledovaniya po mnozhestvam dostizhimosti upravlyaemykh system: diss. ... kand. fiziko-matematicheskikh nauk: 01.01.09. - 2006. – 131 s.
2. Zhuk A.S. Model dvizheniya sudna po programme vykhoda v pytevyuyu tochku / A.S. Zhuk // Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informacionnyi sbornik. – 2020. – № 6. – S. 32 – 36.
3. Zhuk A.S. Model trekhmernogo mnozhestva dostizhimosti dvizheniya sudna / A.S. Zhuk // Eksploatatsiya morskogo transporta. – 2017. – № 2 (83). – S. 51 – 57.
4. Zhuk A.S. Trekhmernue mnozhestva dostizhimosti i prityazheniya sudna s ogranichennym upravleniem / A.S. Zhuk // Eksploatatsiya morskogo transporta. – 2018. – № 2 (87). – S. 32 – 38.
5. Lazarev Y.N. Oblasti dostizhimosti pri mnogokanalnom upravlenii traektoriyami eksperimentalnogo suborbitalnogo samoleta / Y.N. Lazarev, T.A. Bayandina // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. – 2002. – т. 4, № 1. – S. 138 – 143.
6. Tolpegin O.A. Upravlenie raketami na osnove rascheta oblastey dostizhimosti / O.A. Tolpegin // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. – 2015. – Т.14, № 1. S. 73 – 82.
7. Chernousko F.L. Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem. Metod ellipsoidov / F.L. Chernousko. – М.: Nauka, 1988. – 319 s.
8. Shmatkov A.M. Optimalnoe upravlenie i otsenivanie dvizheniya v nekotorykh zadachakh dinamiki: diss. ... d-ra fiziko-matematicheskikh nauk: 01.02.01. - 2012. – 280 s.
9. Shorikov A.F. Metodika approksimatsii oblasti dostizhimosti nelineynoy upravlyaemoy dinamicheskoy sistemy / A.F. Shorikov, A.Y. Goranov // Prikladnaya metematika i voprosy upravleniya. – 2017. – № 2. – S. 112 – 120.
10. Astrein V.V. Multicriteria assessment of optimal forecasting models in decision support systems to ensure the navigation safety / V.V. Astrein, S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012108.
11. Astrein V.V. Selection of optimal forecasting models in the navigation safety decision support system / V.V. Astrein, S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan // Journal of Physics: Conference Series. "International

- Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012104.
12. Hua C. Reachable set modeling and engagement analysis of exoatmospheric interceptor / C. Hua, L. Yangang, C. Lei, T. Guojin // Chinese Journal of Aeronautics. – 2014. – 27(6). – P. 1513 – 1526.
 13. Kondratyev S.I. Human-machine system as a control shell in the implementation of mooring operations / S.I. Kondratyev, A.L. Boran-Keshishyan, V.V. Popov, A.E. Slitsan // Journal of Physics: Conference Series. "International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering, AIME 2021". – 2021. – P. 012045
 14. LaValle S.M. Planning Algorithms / S.M. LaValle. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
 15. Mitchell I. A. Time-Dependent Hamilton–Jacobi Formulation of Reachable Sets for Continuous Dynamic Games / Ian M. Mitchell, Alexandre M. Bayen, Claire J. Tomlin // IEEE transactions on automatic control. – 2005. – Vol. 50, No. 7. – P. 947 – 957.
 16. Shima T. UAV Cooperative Decision and Control / T. Shima, S. Rasmussen. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009 – 164p.
 17. Wu A. Guaranteed Avoidance of Unpredictable, Dynamically Constrained Obstacles using Velocity Obstacle Sets / A. Wu. – Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2011 – 116p.

УДК 656.618.1: [629.5.018.712:517.958]

DOI: 10.34046/aumsuomt105/3

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ БУКСИРУЕМОГО СУДНА ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ И ДЛИНЫ БУКСИРНОГО ТРОСА

Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор

Г.Ю. Ищейкин, соискатель

В статье представлен анализ способов управления параметрами движения буксируемого судна, входящего в состав буксирной системы, посредством регулирования натяжения и (или) длины буксирного троса в процессе выполнения буксирной операции. Анализ выполнен по результатам модельных экспериментов с использованием математической модели буксируемого судна и буксирного троса. На основании системного анализа процесса движения буксируемого судна, выявлены основные зависимости значений кинематических параметров его движения при регулировании натяжения и длины буксирного троса, а также установлен наиболее эффективный способ регулирования.

Ключевые слова: буксирная операция, буксируемое судно, буксирный трос, натяжение троса, управляемость судна

CONTROLLING THE MOVEMENT OF A TOWED VESSEL BY CHANGING THE TENSION AND LENGTH OF THE TOWLINE

Yudin Yu.I., Ishcheikin G.Yu.

The article presents an analysis of ways to control the motion parameters of a towed vessel, which is part of the towing system, by adjusting the tension and (or) length of the towing cable during the towing operation. The analysis is based on the results of model experiments using a mathematical model of a towed vessel and a towing cable. Based on a systematic analysis of the process of movement of a towed vessel, the main dependences of the values of the kinematic parameters of its movement were identified when adjusting the tension and length of the towing cable, and the most effective method of regulation was established.

Key words: towing operation, towed vessel, towing cable, cable tension, vessel controllability

Введение

Буксирная операция (буксировка) – одна из сложнейших судовых ключевых операций, выполнение которой сопряжено с высокой степенью риска аварии или, как минимум, аварийного происшествия.

Из этого следует, что совершенствование способов управления движением буксирной системы (буксирующее судно - буксирный трос - буксируемое судно) одна из важнейших задач, решение которой будет способствовать обеспечению безопасности судовождения в процессе выполнения буксирных операций. В большинстве работ, касающихся процедуры выполнения буксирной операции и обеспечения безопасности судовождения в процессе её выполнения, авторы, в

основном, ссылаются на практический опыт, который, как известно, не может охватить все возможные варианты буксирных операций (состав буксирной системы, внешние факторы и пр.).

Безусловно, эмпирические способы оценки влияния различных факторов, определяющих степень безопасности буксирной операции и следующие из этого выводы и предложения по обеспечению этой безопасности, широко используются на практике. Тем не менее, именно практика свидетельствует о том, что этого недостаточно и, как следствие, требуется постоянное совершенствование способов и методов управления как буксирной системой в целом, так и отдельных ее элементов, в частности, буксируемым судном.