

СУДОСТРОЕНИЕ, СУДОРЕМОНТ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ФЛОТА

DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-7-13
УДК 656.61.052.4

ОПТИМАЛЬНОЕ МАНЕВРИРОВАНИЕ СУДНА К АВАРИЙНОМУ ОБЪЕКТУ

*М. С. Бобрович, **В. И. Меньшиков**, К. В. Пеньковская*

*Мурманский государственный технический университет,
Мурманск, Российская Федерация*

Выполнен обзор процесса планирования поиска терпящего бедствие судна как тактического метода проведения поисково-спасательной операции, которая представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, способствующих обнаружению координат местоположения терпящего бедствие. Доказано, что эффективность рассмотренного метода планирования зависит от априорно заданной области, в которой ведется поиск и обнаружение терпящего бедствие. Современные судна оснащаются такими техническими средствами навигации и связи, которые однозначно решают проблему неопределенности в текущем месте аварийного судна. Известные тактические методы проведения поисково-спасательной операции могут быть расширены за счет организации выхода спасательного судна в заданную точку в минимальный интервал времени, что позволяет повысить вероятность сохранения жизней. При условии, что технические средства судовождения и связи обеспечивают постоянную передачу информации о местоположении аварийного объекта, составлена модель вывода судна-спасателя к аварийному объекту с максимальным быстродействием. При составлении модели метода допускалось, что координаты аварийного судна постоянно транслируются в эфир, а сам аварийный объект под действием внешних факторов (ветра, течения) дрейфует прямолинейно и с постоянной скоростью. При оценке эффективности выполнения этого метода в качестве показателя эффективности был использован критерий быстродействия. Для определения минимального времени выхода судна из начала декартовой системы координат, когда вектор скорости этого судна совпадет по направлению с положительным направлением абсциссы, к аварийному объекту достаточно использовать выбор оптимальной траектории, основанный на принципе максимума Понтрягина. Условия, обеспечивающие применение принципа Понтрягина, выполняются, и поэтому рассматриваемая краевая задача при заданной динамике судна, краевых условиях и заданных ограничениях имеет единственное решение. Это решение позволяет утверждать, что маневрирование судна-спасателя можно осуществить в минимальное время (с максимальным быстродействием) и с показателем эффективности спасательной операции по сохранению жизни, равному единице.

Ключевые слова: маневрирование судна, аварийный объект, принцип Понтрягина, максимальное быстродействие, показатель эффективности спасательной операции.

Для цитирования: Бобрович М. С., **Меньшиков В. И.**, Пеньковская К. В. Оптимальное маневрирование судна к аварийному объекту // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 7–13. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-7-13.

Введение

Во время плавания судна важное место занимает процедура его выхода в заданную точку, например для осуществления операции по поиску и спасению. В данном случае под процедурой следует понимать траекторное движение судна от момента начала движения до выхода судна в точку оказания помощи аварийному объекту [1–3]. Успешное маневрирование, связанное с выполнением задачи по спасению жизни людей, зависит от того, как оперативно вахтенный

судоводитель зафиксирует координаты аварийного объекта и будет использовать информацию о действии гидрометеорологических факторов. Координаты аварийного объекта в настоящее время можно получить в системе ГМССБ. В этом случае маневрирование может быть эффективным, если у аварийного объекта, попавшего в опасную ситуацию, неопределенность текущего места будет минимальной. Однако минимальная неопределенность текущего места аварийного объекта не зависит от времени следования спасателя к этому объекту. Следовательно, чем быстрее спасательное судно выйдет в точку с координатами аварийного объекта, тем выше вероятность эффективного проведения спасательной операции.

Рассмотрим выполнения маневра по выводу судна-спасателя к аварийному объекту, несколько упростив ситуацию, а именно будем считать, что аварийный объект под действием внешних факторов (ветра, течения) дрейфует прямолинейно и с постоянной скоростью. Поэтому, учитывая именно такое движение аварийного объекта, следует как можно быстрее вывести спасательное судно в заданную по ГМССБ позицию для помощи, поскольку со временем растет вероятность того, что движение и положение аварийного объекта будут изменяться. С другой стороны, уменьшение времени на выполнение маневра приводит к повышению вероятности отсутствия последствий для состояния человеческого фактора на аварийном объекте. Таким образом, при оценке эффективности выполнения маневра выхода на аварийный объект целесообразно в качестве показателя этой эффективности использовать время его выполнения (критерий быстродействия).

Краткий обзор способов проведения поисковых операций

В работе [4] проведено исследование процесса планирования операций по поиску аварийных объектов. Достаточно подробно рассматриваются схемы маневрирования судна-спасателя в априорно заданной области. Схемы маневрирования судна-спасателя в этой области реализуются путем поиска на вероятном курсе, поиска переменными курсами, поиска завесой и поиска веером. Любая из перечисленных выше схем маневрирования судна-спасателя привлекает гипотезу об отсутствии какой-либо информации относительно местоположения аварийного судна. Однако аварийная информация, поступающая от современных технических средств по обеспечению безопасности на море, и аварийные сообщения, передаваемые в сетях безопасности, всегда содержат данные о положении аварийного судна в пространственно-временном континууме. Наличие координат аварийного объекта и судна-спасателя преобразует поисковую задачу в граничную задачу, в которой с учетом дополнительных условий траекторию судна-спасателя можно найти, привлекая функцию Понтрягина. Функция Понтрягина позволяет не только определить оптимальную по быстродействию траекторию выхода к аварийному судну, но и вписать задачу поиска аварийного объекта в область задач с минимаксной идеологией.

Методы и результаты исследования

Прежде чем переходить к постановке и решению основной задачи, рассмотрим дополнительную задачу, результат решения которой потребуются в дальнейшем [5, 6]. Так, в классах кусочно-гладких функций $x(t)$, $y(t)$, $\theta(t)$ и кусочно-непрерывных управлениях $u(t)$ необходимо определить

$$T \rightarrow \inf,$$

если динамика судна при следовании по заданному маршруту описывается системой уравнений вида:

$$\begin{cases} dx/dt = v_0 \sin\theta; \\ dy/dt = v_0 \cos\theta; \\ d\theta/dt = v_0 u / R, \end{cases} \quad (1)$$

а краевые условия заданы таким образом:

$$x(0) = 0, y(0) = 0, \theta(0) = \pi / 2; \quad (2)$$

$$|y + x \operatorname{ctg} v - R|_{t=T} = 0 \quad (3)$$

при ограничении на управляющую переменную

$$-1 \leq u(t) \leq 1. \quad (4)$$

Геометрический смысл данной задачи состоит в том, чтобы определить минимальное время выхода судна $C(t)$ из начала декартовой системы координат YOX , где вектор его скорости совпадет по направлению с положительным направлением оси OX на полупрямую KL , направление которой задано углом ν .

В рамках такой физической аналогии для поиска оптимальной траектории можно использовать принцип максимума Понтрягина [5]. В рамках этого принципа гамильтониан системы можно записать следующим образом:

$$H(\theta, u, W_0, \Psi^*) = W_0 + \gamma_0(W_1 \sin \theta + W_2 \cos \theta + W_3 u / R) + 1,$$

где $\Psi^* = (W_1, W_2, W_3)$.

При этом сопряженная системе (1) система уравнений может быть записана как

$$\begin{cases} dW_1 / dt = 0; \\ dW_2 / dt = 0; \\ dW_3 / dt = W_1 \cos \theta + W_2 \sin \theta, \end{cases} \quad (5)$$

а условия трансверсальности определяются следующим образом:

$$\begin{cases} W_1(T) = \alpha \operatorname{ctg} \nu; \\ W_2(T) = \alpha; \\ W_3(T) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$H(\theta(T), u(T), W_0, \Psi^*) = 0. \quad (7)$$

Тогда в соответствии с условием принципа максимума

$$H \xrightarrow{u} \sup$$

получим подозрительное на оптимальность управление

$$u^*(t) = -\operatorname{sign} W_3. \quad (8)$$

Соотношения (1)–(8) являются краевой задачей принципа максимума Понтрягина, в которой определяются функции $x, y, \theta, u^*, \Psi^*$ и их параметры T, α, W_0 .

Для решения краевой задачи (1)–(8) предположим, что $W_3(0) > 0$, тогда найдем:

$$u^*(t) = -1; \quad \theta(t) = \pi / 2 - \nu_0 t / R;$$

$$x(t) = R \sin \nu_0 t / R; \quad y(t) = R(1 - \cos \nu_0 t / R).$$

Из выражения (3) следует, что

$$T = R\nu / u,$$

а на основании (5)–(6) можно получить

$$W_1(t) = \alpha \operatorname{ctg} \nu; \quad W_2(t) = \alpha;$$

$$W_3(t) = \alpha R(1 - \cos(\nu_0 t / R - \nu)) / \nu_0 \sin \nu.$$

В то же время условие (7) позволяет определить величину α . Поскольку

$$W_0 + (\operatorname{ctg} \nu \cos \nu + \sin \nu) \nu_0 \alpha = 0,$$

то

$$\alpha = -W_0 \sin \nu / \nu_0,$$

а при $t = 0$

$$W_3(0) = -W_0(R/v_0)[(1 - \cos v)/v_0].$$

В соответствии с принципом максимума должны выполняться следующие условия:

$$W_0 \leq 0, \quad |W_0| + |\Psi^*(t)| > 0, \quad \forall t \in [0, T],$$

следовательно, вариант $W_0 = 0$ не может быть принят во внимание, поскольку

$$t = 0: |\Psi^*(t)| = 0 \quad \text{и} \quad W_0 < 0.$$

Если далее предположить, что $W_3(0) < 0$, то на основании таких же выкладок можно найти

$$T = Rv/v_0 + 2k\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

и считать, что этот вариант не оптимален по отношению к первому случаю, когда $W_3(0) > 0$.

Если же исходить из того, что $W_0(0) = 0$, то, принимая во внимание автономность систем, получим

$$\alpha = -W_0,$$

причем $W_0 < 0$.

Тогда при $t = 0$ имеем

$$dW_3(t)/dt = \alpha > 0,$$

и в достаточно малой окрестности нуля должно выполняться условие $W_3(t) > 0$. Следовательно,

$$W_0(0) = -[(1 - \cos v)/v_0] W_0(R/v_0),$$

что противоречит предположению о том, что $W_3(0) = 0$.

Обсуждение результата

Таким образом, получено единственное подозрительное на оптимальность управление и функции, определяющие характер траекторного движения судна при выполнении, например, маневра «человек за бортом», которые можно записать следующим образом:

$$u^*(t) = -1; \quad x(t) = R \sin(vt/R); \quad y(t) = R(1 - \cos(vt/R)); \quad (9)$$

$$T^* = vR/v_0; \quad \theta(t) = \pi/2 - (v_0 t/R).$$

Покажем оптимальность полученных рекомендаций (9) при выполнении маневра выхода на аварийный объект, для чего привлечем достаточные условия оптимальности по [1]. Зададим функцию Кротова следующим образом:

$$K(\theta, t) = \theta R/v_0.$$

В методе Кротова необходимо минимизировать следующие функции:

$$R(x, y, \theta, u, t) = u(t) + 1;$$

$$S(x, y, \theta, T) = \theta R/v_0;$$

$$K(\theta, 0) = (\pi/2)(R/v_0),$$

которым соответствуют показатели-критерии (9):

$$R_{\min}(t) = \inf_{|u| \leq 1} R(u) = 0;$$

$$S_{\min}(T) = \inf(x, y, \theta, T) = (\pi/2 - v)(R/v_0);$$

$$K_{\min} = (\pi/2)(Rv_0).$$

Чтобы величины T^* , u^* , x , y , θ были оптимальными по Кротову, должны выполняться условия:

$$\int_0^{T^*} R(u^*) dt < \int_0^T R_{\min}(t) dt + T^* - T; \quad \forall T \in [0, T];$$

$$S(\theta(T^*)) = S_{\min};$$

$$K(\theta(0)) = K_{0 \min}.$$

В данном случае эти условия выполняются, поскольку

$$R(u^*(t)) = 0; \quad S(\theta(T^*)) = (\pi / 2)(R / v_0),$$

и, следовательно, можно признать, что краевая задача $T \rightarrow \inf$ при заданной динамике судна, краевых условиях и ограничениях (1)–(4) имеет единственное решение вида (9). Анализ этого выражения позволяет утверждать, что маневр к аварийному объекту должен быть реализован в минимальное время T_{\min} , равное, например, величинам, определенным по графику «Реальные верхние пределы времени выживания людей в воде», представленному в международном документе [3]. Если далее использовать величины реальных верхних пределов времени выживания людей в воде T_{\min} , то появляется возможность оценки качества выполнения спасательной операции. Для этой цели достаточно составить индикаторную функцию вида:

$$f(T, T_{\min}) = \begin{cases} 1 & \text{при } T \leq T_{\min}; \\ 0 & \text{при } T > T_{\min}, \end{cases}$$

в соответствии с которой единицей определяется успешное состояние спасательной операции, а нулем – неуспешное. Оценку качества будущей спасательной операции можно проводить еще до этапа ее реализации, если известны величины T и T_{\min} .

Заключение

Составленная модель маневрирования судна-спасателя при его выходе к аварийному объекту не отменяет использования традиционных схем маневрирования по поиску и спасению, рассмотренных в работе [4], а только расширяет спектр приемов маневрирования. Выбор той или иной схемы маневрирования должен осуществляться только по признаку наличия у судна-спасателя информации о пространственных и временных координатах аварийного объекта. Такого рода информация передается радиотехническими средствами по сетям безопасности, а форматы сообщений являются универсальными и утверждены соответствующими международными документами [1–3].

Определение траектории при минимальном времени достижения судном-спасателем аварийного объекта и оказания ему помощи предложено реализовать, используя для этой цели как принцип максимума Понтрягина, так и принцип оптимальности по Кротову, которые доказывают, что краевая задача $T \rightarrow \inf$ при заданной динамике судна-спасателя, краевых условиях и ограничениях имеет единственное решение. При этом конкретные числовые показатели быстродействия операции по спасению определены в международных документах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Международная конвенция по поиску и спасению на море 1979 года*. СПб.: ЦНИИМФ, 2005. 63 с.
2. *Международная конвенция о спасении 1989 года*. СПб.: ЦНИИМФ, 1999. 50 с.
3. *Международное авиационное и морское наставление по поиску и спасению (Наставление ИАМСАР)*. Кн. 3. Подвижные средства. СПб.: ЦНИИМФ, 2016. 523 с.
4. *Яппаров Е. Р., Алексеев В. В.* Особые способы проведения поисковой операции // *Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология*. 2020. № 4. С. 23–35.
5. *Васильев Ф. П.* Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 518 с.
6. *Кротов В. Ф., Букреев В. З., Гурман В. И.* Новые методы вариационного исчисления в динамике полета. М.: Машиностроение, 1969. 288 с.

Статья поступила в редакцию 28.04.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Сергеевич Бобрович – аспирант кафедры судовождения; Мурманский государственный технический университет; Россия, 183010, Мурманск; bobrovich.maks@yandex.ru.

Вячеслав Иванович Меньшиков – д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры судовождения; Мурманский государственный технический университет; Россия, 183010, Мурманск; menishikovvi@mstu.edu.ru.

Ксения Вячеславовна Пеньковская – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры судовождения; Мурманский государственный технический университет; Россия, 183010, Мурманск; kseniamgtu@rambler.ru.



OPTIMAL MANEUVERING OF VESSEL TOWARDS EMERGENCY OBJECT

M. S. Bobrovich, V. I. Menshikov, K. V. Penkovskaya

*Murmansk State Technical University,
Murmansk, Russian Federation*

Abstract. The article considers the review of planning for the search of a vessel in distress as a tactical method of conducting a search and rescue operation, which is a set of organizational and technical measures that contribute to the detection of the coordinates of the location of the vessel in distress. It has been proved that the effectiveness of the considered planning method depends on the a priori given area, in which the search and detection of the person in distress is conducted. Modern vessels are equipped with such technical means of navigation and communication that clearly solve the problem of uncertainty in the current location of the emergency vessel. The well-known tactical methods of conducting a search and rescue operation can be expanded by organizing the rescue vessel's getting to a given point in the shortest time interval, which makes it possible to increase the probability of saving the lives. Provided that the technical means of navigation and communication ensure the constant data transfer on the location of the emergency object, there is developed a model of quick approaching the rescue vessel to the emergency object. When drawing up the model of the method, it was assumed that the coordinates of the emergency vessel are constantly broadcast, and the emergency object itself under the influence of external factors (wind, current) drifts rectilinearly and at a constant speed. In the course of evaluating the method effectiveness the performance criterion was used as an efficiency indicator. To determine the minimum time of the ship's leaving the zero point of the Cartesian coordinate system, when the velocity vector of the ship coincides to the positive direction of the abscissa, for the emergency object, it is sufficient to choose the optimal trajectory, according to the Pontryagin maximal principle. The conditions that ensure the application of the Pontryagin principle are met, and therefore the boundary value problem under consideration for a given ship's dynamics, boundary conditions, and given constraints has the only solution that allows maneuvering of the rescue ship to be carried out in the minimum time (with maximum speed) and with a high probability ratio of life saving equal to 1.

Key words: ship maneuvering, emergency object, Pontryagin principle, maximum speed, saving operation efficiency index.

For citation: Bobrovich M. S., Menshikov V. I., Penkovskaya K. V. Optimal maneuvering of vessel towards emergency object. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;3:7-13. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-7-13.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnaia konventsiiia po poisku i spasaniiu na more 1979 goda* [International Convention on Search and Rescue at Sea 1979]. Saint-Petersburg, TsNIIMF, 2005. 63 p.
2. *Mezhdunarodnaia konventsiiia o spasenii 1989 goda* [International Convention on Salvation 1989]. Saint-Petersburg, TsNIIMF, 1999. 50 p.

3. *Mezhdunarodnoe aviatsionnoe i morskoe nastavlenie po poisku i spasaniiu (Nastavlenie IAMSAR). Kniga 3. Podvizhnye sredstva* [International Aviation and Maritime Search and Rescue Manual (IAMSAR Manual). Book 3. Mobile vehicles]. Saint-Petersburg, TsNIIMF, 2016. 523 p.

4. Iapparov E. R., Alekseev V. V. Osobyie sposoby provedeniia poiskovoi operatsii [Special methods of conducting a search operation]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiya*, 2020, no. 4, pp. 23-35.

5. Vasil'ev F. P. *Chislennyye metody resheniia ekstremal'nykh zadach* [Numerical methods for solving extremal problems]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 518 p.

6. Krotov V. F., Bukreev V. Z., Gurman V. I. *Novyye metody variatsionnogo ischisleniia v dinamike poleta* [New methods of calculus of variations in flight dynamics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 288 p.

The article submitted to the editors 28.04.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Maxim S. Bobrovich – Postgraduate Student of the Department of Navigation; Murmansk State Technical University; Russia, 183010, Murmansk; bobrovich.maks@yandex.ru.

Vyacheslav I. Menshikov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Navigation; Murmansk State Technical University; Russia, 183010, Murmansk; menishikovvi@mstu.edu.ru.

Ksenia V. Penkovskaya – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Navigation; Murmansk State Technical University; Russia, 183010, Murmansk; kseniamgtu@rambler.ru.

