

## Особенности расчета параметров маневра уклонения при локально-независимом управлении процессом расхождения судов

Э. Н. Пятаков

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-NT2017-148V16-24>

**Аннотация.** Рассмотрена истинная траектория расхождения судна с целью при опасном сближении и ее формы в зависимости от стороны уклонения. Показано, что двум формам истинной траектории расхождения в общем случае соответствуют четыре формы относительной траектории расхождения, причем приведены численные примеры параметров ситуации сближения, при которых реализуется каждая из форм относительной траектории. Получены аналитические выражения, с помощью которых возможен расчет моментов времени поворота судна для реализации маневра расхождения, зависящие от показателей формы относительной траектории.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, процесс расхождения судов, формы истинной и относительной траекторий расхождения, аналитические выражения расчета параметров стратегии расхождения.

**Введение.** В ситуации опасного сближения судов при дистанции кратчайшего сближения меньше предельно-допустимой дистанции возникает угроза их столкновения, что вызывает необходимость выполнения маневра расхождения. В настоящее время локально-независимое управление является основным принципом управления процессом расхождения судов, который предусматривает контроль каждым из судов текущей ситуации сближения, а в случае опасного сближения судов выбор маневра расхождения производится каждым из них независимо с учетом координации маневров, обеспечивающих их согласованность. Причем система координации в настоящее время реализована в МППСС-72. В процессе расхождения изменением курса приращение истинного курса вызывает приращение относительного курса, которые могут иметь разные знаки, что ведет к неоднозначности расчетов параметров расхождения. Решению этой проблемы посвящена данная статья.

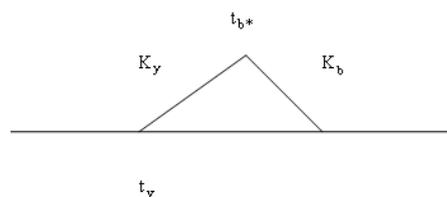
**Краткий обзор публикаций по теме.** Для расхождения оперирующего судна с несколькими опасными целями в работе [1] предложен метод формирования гибких стратегий расхождения методами локально-независимого управления, а в работе [2] освещены принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов, а также приведен анализ методов их реализации и рассмотрены перспективные актуальные способы повышения безопасности предупреждения столкновений судов.

Особенности взаимодействия судов в различных ситуациях опасного сближения и выбор стратегии расхождения для предупреждения их столкновения в зависимости от уровня опасности ситуационного возмущения рассмотрены в работе [3]. Способ выбора оптимального маневра расхождения пары судов представлен в работе [4], а стратегия экстренного расхождения судов в ситуации их чрезмерного сближении рассмотрена в работе [5].

В работах [6, 7] представлен способ учета инерционности судна и навигационных опасностей в районе маневрирования при расчете параметров стратегии расхождения судна, а в работе [8] процесс расхождения судов формализован в терминах дифференциальной игры.

**Цель.** Целью статьи является анализ особенностей расчета параметров стратегии расхождения судна при его локально-независимом управлении.

**Материалы и методы.** Как показано в работе [2], маневр расхождения судна предусматривает сначала момент времени  $t_y$  его поворот на курс  $K_y$  для уклонения с программной траектории движения, а затем в момент времени  $t_{b*}$  поворот на курс  $K_b$  для возвращения на нее, как показано на рис. 1. Форму истинной траектории расхождения удобно характеризовать показателем  $\delta_y$ , который принимает значение 1 при уклонении судна вправо и -1 в противном случае. Относительная траектория расхождения характеризуется формой с показателями  $\Delta_y$  и  $\Delta_b$ , причем  $\Delta_y = 1$  при относительном уклонении вправо и  $\Delta_y = -1$  в случае относительного уклонения влево. Показатель  $\Delta_b = 1$  при  $\sin(K_{otb} - K_{oty}) > 0$  и  $\Delta_b = -1$  в противном случае.



**Рис. 1.** Характеристика формы истинной траектории расхождения

Очевидно, что истинная траектория расхождения может иметь только две формы, которые определяются показателем  $\delta_y$ , в то время как форма относительной траектории расхождения зависит от значений двух показателей  $\Delta_y$  и  $\Delta_b$ , поэтому имеет четыре разновидности  $\Delta T_i$ , которые представлены в табл. 1.

**Таблица 1.**

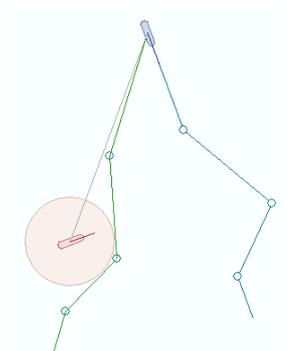
Формы	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	$\Delta T_3$	$\Delta T_4$
$\Delta_y$	-1	1	-1	1
$\Delta_b$	1	-1	-1	1

В качестве примеров на рис. 2÷5 показаны относительные траектории со всеми представленными формами.

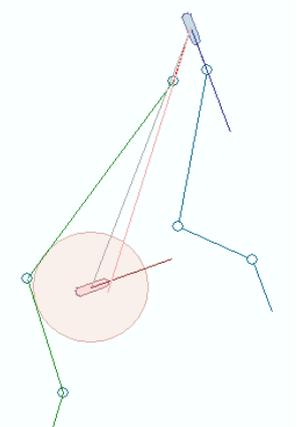
В табл.2 приведены параметры ситуации опасного сближения судов.

**Таблица 2.** Параметры ситуации опасного сближения судов

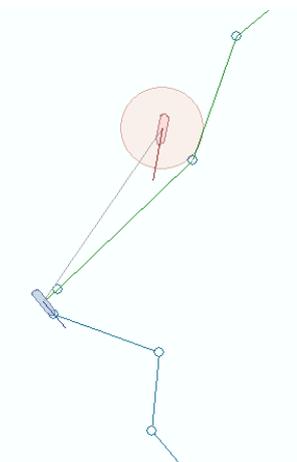
Формы	$\alpha^\circ$	D мили	$K_o^\circ$	$V_o$ узлы	$K_c^\circ$	$V_c$ узлы	Уклонение
$\Delta T_1$	200	5	160	20	70	15	влево
$\Delta T_2$	200	5	160	20	70	15	вправо
$\Delta T_3$	34	5	140	17	190	15	влево
$\Delta T_4$	286	5	180	18	130	25	вправо



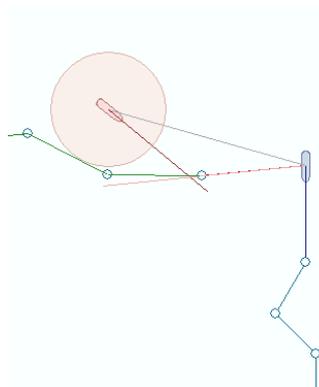
**Рис. 2.** Относительная траектория расхождения формы  $\Delta T_1$



**Рис. 3.** Относительная траектория расхождения формы  $\Delta T_2$



**Рис. 4.** Относительная траектория расхождения формы  $\Delta T_3$

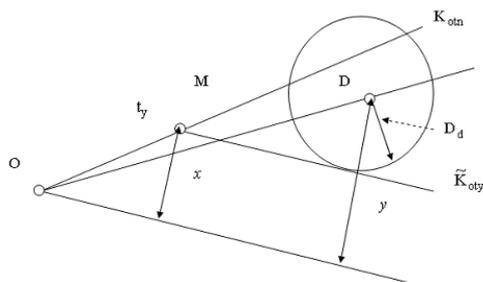


**Рис. 5.** Относительная траектория расхождения формы  $\Delta T_4$

**Результаты и их обсуждение.** Для определения времени уклонения  $t_y$ , т. е. поворота на курс уклонения приведем рис. 6, из которого следует:

$$t_y = \frac{OM}{V_{otn}}$$

где  $V_{otn}$  - начальная относительная скорость.



**Рис. 6.** Определение значения  $t_y$

Искомое значение  $OM$  определяется из выражения:

$$OM = \frac{x}{\sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})}$$

где  $K_{otn}$  - начальный относительный курс.

В свою очередь,

$$x = y - D_d \text{ и } y = \Delta_y D \sin(\tilde{K}_{oty} - \alpha),$$

где  $\Delta_y = \text{sign}[\sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otn})] = \pm 1$ .

Поэтому

$$t_y = \frac{\Delta_y D \sin(\tilde{K}_{oty} - \alpha) - D_d}{\Delta_y V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})} \quad (1)$$

Рассмотрим процедуру расчета момента времени  $t_{b^*}$  поворота судна в сторону его программной траектории движения. Условием безопасного расхождения на участке выхода является равенство дистанции кратчайшего сближения  $D_{\min 2}$  и предельно-допустимой

дистанции  $D_d$ , т. е.  $D_{\min 2} = D_d$ , как показано на рис. 7. Из рис. 7 для форм  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$  относительной траектории расхождения получено выражение для момента времени  $t_{b^*}$  поворота к заданной траектории движения [2]:

$$t_{b^*} = t_y + \frac{\Delta_b D_d + D_n \sin(\alpha_n - K_{otb}) + V_{otn} t_y \sin(K_{otb} - K_{otn})}{V_{oty} \sin(\tilde{K}_{oty} - K_{otb})} \quad (2)$$

где  $\Delta_b = \text{sign}[\sin(K_{otb} - K_{oty})]$ ;  $V_{oty}$  – относительная скорость на участке выхода.

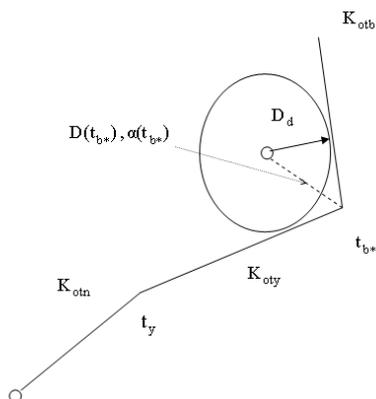


Рис. 7. Определение момента времени  $t_{b^*}$  для форм  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$

Если реализуются формы  $\Delta T_3$  или  $\Delta T_4$ , то расчет величины  $t_{b^*}$  из-за того, что  $\Delta_y \Delta_b = 1$ , производится другим способом. Для получения требуемого аналитического выражения обращаемся к рис. 8.

Из рисунка следует:

$$t_{b^*} = t_y + \frac{D_y \cos(K_{oty} - \alpha_y)}{V_{oty}} \quad (3)$$

где  $\alpha_y$  и  $D_y$  – соответственно пеленг и дистанция до цели в момент времени  $t_y$ .

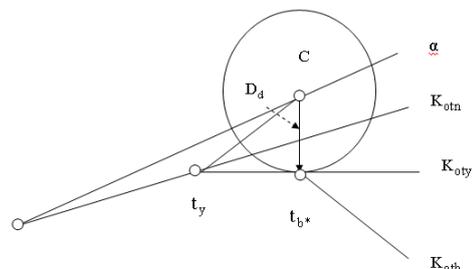


Рис. 8. Определение времени выхода  $t_{b^*}$  для форм  $\Delta T_3$  и  $\Delta T_4$

Таким образом, для расчета параметров стратегии расхождения, как следует из выражений (1)–(3), следует учитывать значения показателей  $\Delta_y$  и  $\Delta_b$  относительной стратегии расхождения.

**Выводы.** 1. Рассмотрена истинная траектория расхождения судна с целью и ее возможные формы в зависимости от стороны уклонения.

2. Показано, что двум формам истинной траектории расхождения соответствуют четыре формы относительной траектории расхождения и приведены примеры реализации каждой из форм.

3. Получены аналитические выражения для расчета моментов времени поворота судна при расхождении, которые зависят от показателей формы относительной траектории, что составляет научную новизну статьи.

#### 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. 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.
3. Пятаков Э.Н. Взаимодействие судов при расхождении для предупреждения столкновения / Пятаков Э.Н., Бужбецкий Р.Ю., Бурмака И.А., Булгаков А.Ю. – Херсон: Гринь Д.С., 2015. - 312 с.
4. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / И.В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
5. Бурмака И.А. Экстренная стратегия расхождения при чрезмерном сближении судов / Бурмака И.А., Бурмака А.И., Бужбецкий Р.Ю. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 с.
6. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
7. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №6. – С. 103 - 107.
8. 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.

#### REFERENCES

1. Tsymbal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsymbal, I. Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.
2. 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.
3. 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.
4. Safin I.V. Choice of optimum maneuver of divergence / I.V. Safin // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2002.- №7. - p. 115 -120.
5. Burmaka I. Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels / Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 p.
6. Burmaka Y.A. Results of imitation design of process of divergence of vessels taking into account their dynamics / Burmaka Y.A. // Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. - 2005.- №10. - P. 21 – 25.
7. Petrichenko E.A. Conclusion of condition of existence of great number of possible manoeuvres of divergence taking into account navigation dangers/ Petrichenko E.A. // Sudovozhdenie.- 2003.- №6. - p. 103 – 107.

#### **Особенности расчета параметров маневра уклонения при локально-независимом управлении процессом расхождения судов**

**Э. Н. Пятаков**

**Аннотация.** Рассмотрена истинная траектория расхождения судна с целью при опасном сближении и ее формы в зависимости от стороны уклонения. Показано, что двум формам истинной траектории расхождения в общем случае соответствуют четыре формы относительной траектории расхождения, причем приведены численные примеры параметров ситуации сближения, при которых реализуется каждая из форм относительной траектории. Получены аналитические выражения, с помощью которых возможен расчет моментов времени поворота судна для реализации маневра расхождения, зависящие от показателей формы относительной траектории.

**Ключевые слова:** *безопасность судовождения, процесс расхождения судов, формы истинной и относительной траекторий расхождения, аналитические выражения расчета параметров стратегии расхождения.*

#### **Features of calculating the parameters of evasion manoeuvre for locally independent control of the process of ship's passing**

**E. N. Pyatakov**

**Abstract.** The true trajectory of the ship's passing is considered with the aim of dangerously approaching and its shape depending on the side of the evasion. It is shown that in the general case there are two forms of the true passing trajectory corresponding to four forms of the relative passing trajectory, with numerical examples of the parameters of the approach situation for each of the forms of the relative trajectory. Analytic expressions are obtained, with the help of which it is possible to calculate the time of turn of the vessel for the implementation of the evasion manoeuvre, depending on the indicators of the form of the relative trajectory.

**Keywords:** *safety of navigation, the process of ship's passing, forms of true and relative evasion trajectories, analytical expressions for calculating the parameters of the evasion strategy.*