

## Оперативный способ определения параметров маневра расхождения

О. А. Петриченко

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

Paper received 16.12.18; Accepted for publication 20.12.18.

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-186VI22-18>

**Аннотация.** Рассмотрен способ оперативного определения маневра расхождения судна с помощью компьютерной программы, который использует области допустимых параметров уклонения судна. Приведена процедура формирования указанных областей, предусматривающая расчет их границ с учетом стороны уклонения судна. Описана процедура выбора безопасного маневра расхождения и приведены численные примеры определения с помощью области параметров маневра расхождения.

**Ключевые слова:** безопасность судоходства, маневр расхождения, области допустимых параметров уклонения.

**Введение.** Навигационные препятствия и интенсивное судоходство значительно осложняют плавание морских судов в стесненных районах и создают предпосылки для возникновения аварийных ситуаций. Стесненные воды являются сложными районами плавания, в которых происходит подавляющее большинство всех навигационных аварий, что свидетельствует о большой сложности условий плавания в стесненных водах.

Из-за быстротекущего изменения навигационной ситуации при плавании в стесненных районах, возникает необходимость разработки оперативных методов оценки опасности сближения и выбора безопасного маневра расхождения. К таким методам относятся применение областей недопустимых значений параметров движения судов, которые могут быть реализованы в компьютерных навигационных системах. Поэтому разработка способов управления судами в ситуации опасного сближения, чему посвящена данная работа, является актуальным и перспективным научным направлением.

**Краткий обзор публикаций по теме.** В работе [1] рассмотрены принципы локально-независимого и внешнего управления процессом расхождения опасно сближающихся судов, причем приведен анализ методов их реализации. В работе [2] предлагается формализовать процесс расхождения методом нелинейной интегральной инвариантности, а в работе [3] приведено подробное исследование методов локально-независимого управления и предложен метод формирования гибких стратегий расхождения. Методы теории оптимальных дискретных процессов используются для описания процесса расхождения в работе [4], а в работе [5] рассмотрены взаимодействие судов в ситуации опасного сближения и выбор стратегии расхождения для предупреждения их столкновения. Процедура выбора оптимального стандартного маневра расхождения пары судов рассмотрена в работе [6], а экстренная стратегия расхождения в ситуации чрезмерного сближения судов предложена в работе [7]. В работах [8, 9] освещены вопросы учета навигационных опасностей и инерционности судна при выборе стратегии расхождения судна.

Теоретическое обоснование автономной судовой системы уклонения от столкновения СА излагается в работе [10]. Также рассматриваются требования к автономной навигации, учитывающие факторы, кото-

рые влияют на процесс уклонения от столкновения. Отмечается, что исследования по автоматизации управления судном могут быть представлены компьютерной технологией, использующую искусственный интеллект.

**Цель.** Целью настоящей статьи является разработка способа оперативного определения параметров маневра уклонения с помощью области допустимых значений параметров.

**Материалы и методы.** В работе [3] в первом приближении момент времени начала уклонения судна для предупреждения столкновения оценивается с помощью формулы:

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

С учетом инерционности судна момент времени начала поворота уклонения  $t_y$  определяется выражением [1]:

$$t_y = \tilde{t}_y - \frac{\Delta_y (\Delta \xi_0 \cos \tilde{K}_{oty} - \Delta \eta_0 \sin \tilde{K}_{oty}) + V_c \tau_y \sin(\tilde{K}_{oty} - K_c)}{V_{otn} \sin(K_{otn} - \tilde{K}_{oty})}$$

где  $\tau_y$  – длительность поворота уклонения судна;

$\Delta \xi_0$  и  $\Delta \eta_0$  – прирост координат оперирующего судна за время поворота  $\tau_y$ ;

$K_c$  – курс цели.

Значение длительности поворота уклонения судна  $\tau_y$ , а также увеличение координат оперирующего судна  $\Delta \xi_0$  и  $\Delta \eta_0$  за время поворота определяются динамической моделью вращательного движения судна. В данном исследовании применяется кинематическая модель вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью  $a_\omega$ . В этом случае, как показано в работе [1]:

$$\tau_y = \left| \frac{K_y - K_o}{a_\omega} \right|,$$

$$\Delta \xi_0(\tau_y) = \frac{V_o}{a_\omega} (\cos K_o - \cos K_y),$$

$$\Delta\eta_o(\tau_y) = \frac{V_o}{a_\omega} (\sin K_y - \sin K_o)$$

**Результаты и их обсуждение.** В дальнейшем рассмотрим параметры уклонения маневра расхождения, к которым относятся момент времени начала уклонения  $t_y$  и курс уклонения  $K_y$ . В случае опасного сближения, как показано в предыдущем подразделе, безопасное уклонение судна от опасной цели на дистанцию кратчайшего сближения равную предельно – допустимой дистанции сближения возможно при начале уклонения в момент времени  $t_y$  курсом уклонения  $K_y$ , которые связаны выражением (1). Данное выражение можно трактовать как кривую на плоскости  $K_y \times t_y$ , предварительно преобразовав относительный курс уклонения  $K_{oty}$  в истинный курс  $K_y$ .

Однако, учитывая возможное уклонение судна, как вправо, так и влево, целесообразно найти зависимость курса уклонения  $K_y$  от момента времени начала уклонения  $t_y$ . Для этого рассмотрим рис. 1, из которого несложно найти зависимость относительного курса  $K_{oty}$  от момента времени  $t_y$ , а затем из полученного значения  $K_{oty}$  по известной зависимости определить величину  $K_y$ .

Как следует из приведенного рисунка, для произвольного момента времени начала уклонения судна  $t_y$  относительные курсы уклонения вправо  $K_{otys}$  и влево  $K_{otyp}$  определяются выражениями:

$$K_{otys} = \alpha_y + \frac{D_d}{D_y},$$

$$K_{otyp} = \alpha_y - \frac{D_d}{D_y}. \quad (2)$$

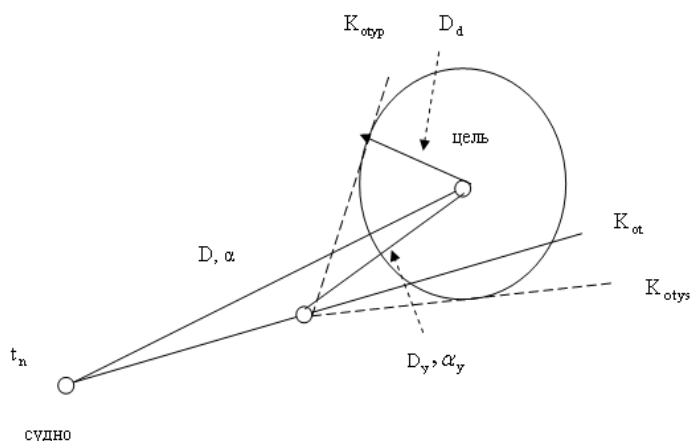


Рис. 1. Определение относительного курса уклонения

Выражения для расчета значений дистанции  $D_y$  и пеленга  $\alpha_y$  на момент времени  $t_y$  определяются из рис. 1 и имеют вид:

$$D_y = \sqrt{V_{ot}^2 t_y^2 + D^2 - 2DV_{ot} t_y \cos(K_{ot} - \alpha)}, \quad (3)$$

$$\alpha_y = K_{ot} + \arcsin \frac{D_d}{D_y}$$

Из полученных значений  $K_{otys}$  и  $K_{otyp}$  по известной формуле [1] для движения судов на встречных курсах определяются истинные курсы уклонения:

$$K_{ys} = K_{otys} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - K_{otys})],$$

$$K_{yp} = K_{otyp} + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - K_{otyp})] \quad (4)$$

где  $K_c$  - курс цели.

Выражения (4) зависимости курсов уклонения  $K_{ys}$  и  $K_{yp}$  от времени  $t_y$  можно рассматривать как границы  $G_{ys}$  и  $G_{yp}$  на плоскости  $K_y \times t_y$ , разделяющие ее на две части: допустимых сочетаний, как точек  $(t_y, K_y)$ , для которых дистанция кратчайшего сближения  $D_{min}$  превосходит предельно-допустимую дистанцию  $D_d$ , т.е.  $D_{min} > D_d$ , и недопустимых точек, для которых  $D_{min} < D_d$ . Область точек  $(t_y, K_y)$  между границами  $G_{ys}$  и  $G_{yp}$  является областью  $Q_{K,ty}$  недопустимых значений параметров уклонения  $(t_y, K_y)$ , как показано на рис. 2.

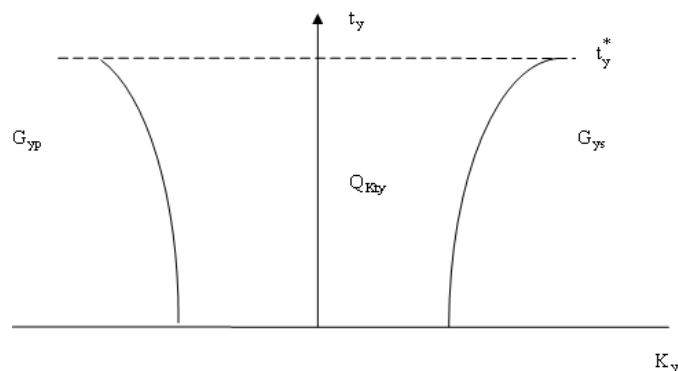


Рис. 2. Область  $Q_{K,ty}$  опасных значений параметров уклонения

С помощью выражений (2) ÷ (4) производится расчет границ  $G_{ys}$  и  $G_{yp}$  области  $Q_{K,ty}$ . Отметим, что момент времени уклонения  $t_y$  изменяется от 0 до  $t_y^*$ . Причем верхняя граница времени  $t_y^*$  определяется в зависимости от соотношения скоростей судна  $V_o$  цели  $V_c$ . Так, в случае превосходства скорости судна над скоростью цели, т.е.  $V_o > V_c$ , верхняя граница момента времени  $t_y^*$  определяется моментом времени, когда судно достигает границы окруж-

ности с радиусом  $D_d$ . Следовательно, справедливо соотношение:

$$t_y^* = \frac{D - D_d}{V_{ot}}$$

Для формирования области недопустимых значений параметров уклонения  $Q_{K,ty}$  была разработана компьютерная процедура информационной системы. В качестве примера рассмотрена ситуация опасного сближения судна с целью, которая характеризуется параметрами  $D=3$  мили,  $\alpha=88^\circ$ ,  $K_o=45^\circ$ ,  $V_o=23$  узла,  $K_c=315^\circ$ ,  $V_c=20$  узлов. Графическое отображение начальной ситуации опасного сближения судна с целью показано на рис. 3.

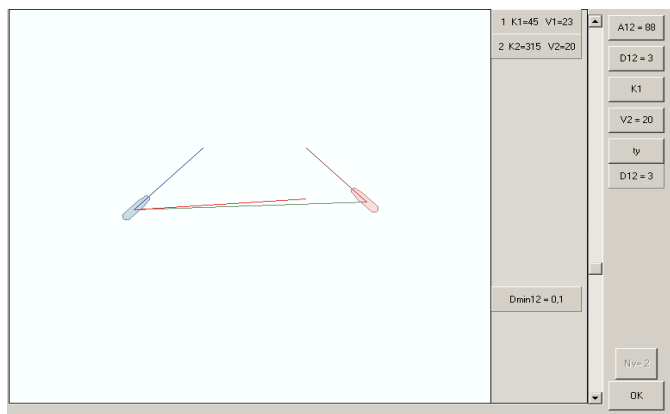


Рис. 3. Начальная ситуация опасного сближения судна с целью

С помощью компьютерной процедуры была сформирована область недопустимых значений параметров уклонения  $Q_{K,ty}$ , которая представлена на рис. 4. По оси абсцисс нанесены значения курсов уклонения  $K_y$ , а по оси ординат - значения времени уклонения  $t_y$ . Область  $Q_{K,ty}$  разделена курсом  $K_{y\alpha}$  на две части, причем курс  $K_{y\alpha}$  соответствует относительному курсу, который равен пеленгу на цель.

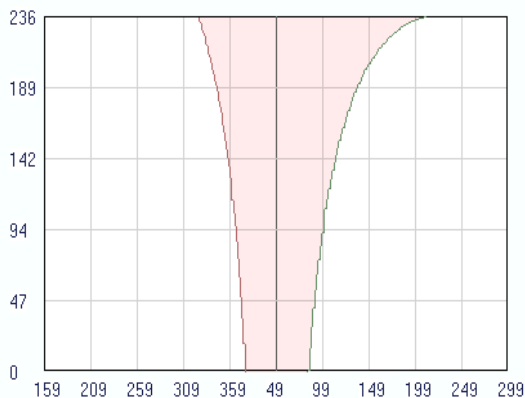


Рис. 4. Границы  $G_{ys}$  и  $G_{yp}$  области  $Q_{K,ty}$  приведенного примера

Очевидно:

$$K_{y\alpha} = \alpha + \arcsin [p^{-1} \sin(K_c - \alpha)]$$

В приведенном примере  $K_{y\alpha} = 49^\circ$ , справа от него находится граница  $G_{ys}$  уклонения вправо, а слева - граница  $G_{yp}$  уклонения влево. По определению на границах дистанция кратчайшего сближения равна предельно – допустимой дистанции сближения, которая в данном примере выбрана равной 1 миле.

На рис. 5 показан маневр уклонения судна изменением курса вправо с параметрами  $t_y = 15$  с и  $K_y = 86^\circ$ , которые принадлежат правой границе  $G_{ys}$  области  $Q_{K,ty}$ . Этим параметрам соответствует дистанция кратчайшего сближения  $L_m = 1$  миле, что подтверждает корректность способа формирования области  $Q_{K,ty}$ .

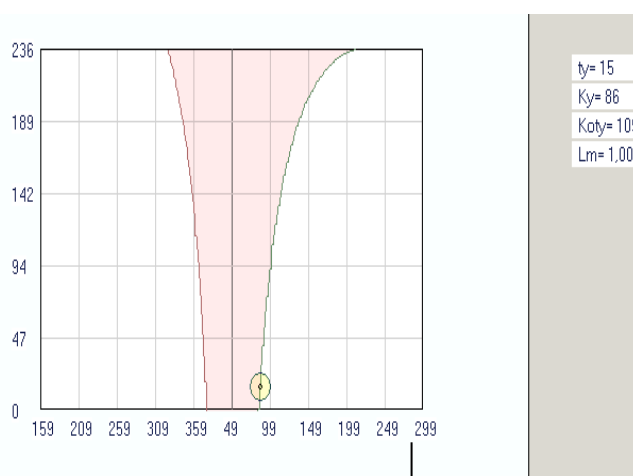


Рис. 5. Выбор безопасных параметров уклонения изменением курса вправо

Точка с параметрами уклонения  $t_y = 123$  с и  $K_y = 107^\circ$ , показанная на рис. 6, также принадлежит правой границе  $G_{ys}$  и обеспечивает сближение судна с целью на дистанцию  $L_m = 1$  мили.

Если выбрать точку, принадлежащую левой границе  $G_{yp}$ , например, с параметрами  $t_y = 96$  с и  $K_y = 5^\circ$  (как показано на рис. 7), то дистанция кратчайшего сближения  $L_m = 1$  мили равна предельно-допустимой дистанции сближения.

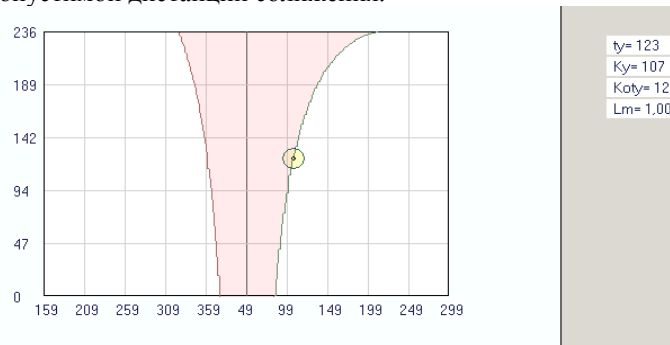


Рис. 6. Выбор параметров уклонения  $t_y = 123$  с и  $K_y = 107^\circ$

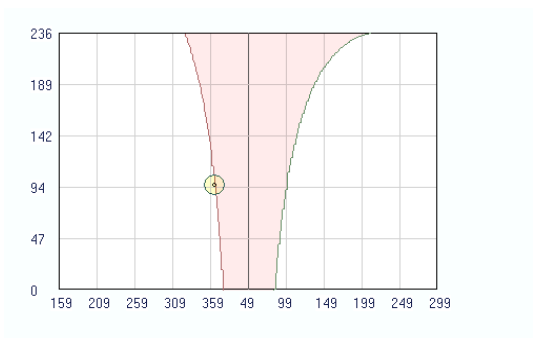


Рис. 7. Безопасные параметры уклонения изменением курса влево

### Выводы

1. Рассмотрен способ оперативного определения маневра расхождения судна с помощью компьютерной программы, который использует области допустимых параметров уклонения судна.
2. Приведена процедура формирования указанной области, которая рассчитывает их границ с учетом стороны уклонения судна.
3. Описана процедура выбора безопасного маневра расхождения и приведены численные примеры определения с помощью области параметров маневра расхождения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Павлов В.В. Некоторые вопросы алгоритмизации выбора маневра в ситуациях расхождения судов/ В.В. Павлов, Н.И. Сеньшин // Кибернетика и вычислительная техника. – 1985. - № 68. - С. 43-45.
3. Цымбал Н.Н. Гибкие стратегии расхождения судов / Н.Н. Цымбал, И.А. Бурмака, Е.Е. Тюпиков. - Одесса: КП ОГТ, 2007. – 424 с.
4. Куликов А. М. Оптимальное управление расхождением судов / А. М. Куликов, В. В. Поддубный // Судостроение. – 1984. - № 12. - С. 22-24.
5. 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.
6. Сафин И.В. Выбор оптимального маневра расхождения / И.В. Сафин // Автоматизация судовых технических средств. - №7. - 2002. - С. 115-120.
7. 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.
8. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / Бурмака И.А. // Судовождение. – 2005. - №10. – С. 21 – 25.
9. Петриченко Е.А. Вывод условия существования множества допустимых маневров расхождения с учетом навигационных опасностей / Петриченко Е.А. // Судовождение. – 2003. – №6. – С. 103 - 107.
10. 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.

### REFERENCES

1. 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.
2. Pavlov V.V. Some questions of choice of maneuver in the situations of divergence of vessels/ Pavlov V.V., Senshin N.I. // Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika. - 1985.- №68. - p. 43 - 45.
3. Tsybmal N. Flexible strategies of divergence of vessels / N. Tsybmal, I.Burmaka, E. Tyupikov, Odessa: KP OGT, 2007. – 424 p.
4. Kulikov A.M. Optimum management by divergence of vessels / Kulikov A.M., and Poddubnyy V.V.// Sudostroenie. - 1984.- №12.- p. 22 - 24.
5. 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.
6. Safin I.V. Choice of optimum maneuver of divergence / I.V. Safin // Avtomatizatsiya sudovykh tekhnicheskikh sredstv. - 2002.- №7. - p. 115 -120.
7. Burmaka I. Urgent strategy of divergence at excessive rapprochement of vessels / Burmaka I., Burmaka A., Buzhbetskiy R. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 202 p.
8. 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.
9. 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.

### Operative method of determination of parameters of maneuver of divergence

O. A. Petrenchenko

**Abstract.** The method of operative determination of maneuver of divergence of ship by the computer program is considered, which uses the regions of possible parameters of deviation of ship. Procedure of forming of the indicated regions is resulted, foreseeing the calculation of their scopes taking into account the side of deviation of ship. Procedure of choice of safe maneuver of divergence is described and the numeral examples of determination by the region of parameters of maneuver of divergence are resulted.

**Keywords:** safety of navigator, maneuver of divergence, region of possible parameters of deviation.