

УДК656.61.052.484

**CHOICE OF SHIP SAFE ZONE OPTIMUM SHAPE****ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ СУДОВОЙ БЕЗОПАСНОЙ  
ЗОНЫ****A. O. Jakushev, PhD student****А. О. Якушев, аспирант***Odessa National Maritime Academy, Ukraine**Одесская Национальная Морская Академия, Украина***ABSTRACT**

The ship safe zones of different forms are examined, intended for providing the safe navigation of vessels. The question of choice of optimum form of safe zone is considered.

It is shown that an optimum safe zone has a shape, which provides minimal deviation of ship for safe passing by the obstruction.

**Key words:** safety of navigation, ship safe zone, optimum shape, minimal deviation.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами**

Одной из наиболее актуальных проблем безопасности судовождения является проблема безопасного расхождения судов. Важным аспектом предупреждения столкновения судов является выявление на ранних стадиях развития ситуации опасного сближения.

Для предупреждения столкновений судов используется безопасная область, в которой находится судно, причем в эту область не должны попадать другие объекты во избежание столкновений. Форма безопасной судовой области определяющим образом влияет на выявления ситуации опасного сближения.

Поэтому получение способа выбора оптимальной формы судовой безопасной области является актуальным и перспективным направлением.

**Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы**

В работе [1] изложены вопросы расхождения судов с применением классификации начальных ситуаций, а в работе [2] рассмотрены основные вопросы теории и практики управления судами в различных ситуациях.

Работа [3] посвящена проблеме учета маневренных характеристик судна для обеспечения безопасности плавания.

Для предупреждения столкновений судов используется безопасная область, в которой находится судно, причем в эту область не должны попадать другие объекты во избежание столкновений. На выявление ситуации опасного сближения определяющим образом влияет форма безопасной области судна.

Следует отметить, что вопросу построения судовой безопасной области посвящено большое количество работ, причем стандартным описанием такой области является круг, в центре которого находится судно, а радиусом является предельно-допустимая дистанция сближения. Очевидно, что в этом случае судовая безопасная область определяется величиной предельно-допустимой дистанцией сближения.

Однако в ряде работ предлагается другая форма судовой безопасной области риска столкновения. Так, в работе [4] в качестве критерия безопасности предлагается «область столкновения», под которой имеется в виду некоторая область по направлению движения судна.

В работе [5] авторами Спейменом В. и Кримптоном К. описана эллипсом зону навигационной безопасности, которая используется в автоматизированной радиолокационной системе. При этом кривая, которая ограничивает зону, описывается из центра тяжести судна радиусом переменной длины, который зависит от длины судна, его скорости и курсового угла радиуса.

Процедура расчета большой оси эллипса зоны навигационной безопасности, как «динамической длины судна» и малой оси эллипса, как «динамической ширины судна» для плавания в портовых водах предложена в работе [6], причем оба параметра зависят от длины и ширины судна, его скорости и протяженности тормозного пути.

#### **Формулировка целей статьи (постановка задачи)**

Целью данной статьи является разработка способа выбора оптимальной формы судовой безопасной области.

#### **Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов**

В настоящее время в качестве безопасной судовой области, кроме круга с заданным радиусом, предлагаются области другой формы. Очевидно, при маневрировании для безопасного прохождения препятствия судно должно отклоняться от программной траектории и пройти мимо опасной области препятствия.

Для оценки опасной области различной формы целесообразно определить граничные размеры области  $D$ , при которой препятствие находится в области с заданной вероятностью  $P_d$ , близкой к единице. Отклонение судна от курса  $\Delta K_y$  для следования по касательной к опасной области  $D$  при заданной дистанции между судном и препятствием может служить характеристикой экономичности области.

Полагая, что точность определения положения препятствия относительно судна известна и характеризуется двумерной плотностью распределения  $f(x, y)$  векториальной погрешности, при наличии нескольких областей различной формы для выбора предпочтительной области следует определить граничные размеры области  $D$  и рассчитать соответствующие отклонения от курса  $\Delta K_y$ . Очевидно,

предпочтительной будет область той формы, которой соответствует меньшее значение  $\Delta K_y$ .

Допустим, имеется три типа опасной области, имеющие наиболее распространенные формы круга, эллипса и прямоугольника. Обозначим соответствующие области  $D_c$ ,  $D_e$  и  $D_R$ . Положение цели относительно судна характеризуется векториальной погрешностью с двумерной плотностью распределения  $f(x, y)$ . Найдем геометрические характеристики упомянутых трех областей, характеризующих нахождение цели в области с вероятностью  $P_d$ . Для этого необходимо решить уравнения, определяющие вероятность нахождения судна в заданной области:

$$\iint_{D_c} f(x, y) dx dy = P_d, \quad \iint_{D_e} f(x, y) dx dy = P_d, \quad \iint_{D_R} f(x, y) dx dy = P_d.$$

В результате решения находятся параметры областей, по которым производилось интегрирование, а затем для одинаковых относительных позиций судна и препятствия определяются отклонения от курса  $\Delta K_y$  для безопасного прохождения препятствия. Если получены отклонения  $\Delta K_{yc}$ ,  $\Delta K_{ye}$  и  $\Delta K_{yR}$  по каждой из областей, то оптимальной будет та форма безопасной области, для которой будет минимальным значение отклонения  $\Delta K_{y0}$ , т.е.  $\Delta K_{y0} = \min\{\Delta K_{yc}, \Delta K_{ye}, \Delta K_{yR}\}$ .

Для описания случайных погрешностей навигационных измерений применяется распределение Гаусса, двумерная плотность которого имеет вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + 2\frac{xy}{\sigma_{xy}}\right)\right],$$

где  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  - средние квадратические отклонения векториальной погрешности соответственно по осям  $x$  и  $y$ , причем:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}, \quad \sigma_y = \sqrt{D_y} \quad \text{и} \quad \sigma_{xy} = \sqrt{D_{xy}}.$$

С другой стороны ковариационная матрица  $K(x, y)_{\min}$  выражается через центральные и смешанные моменты второго порядка следующим образом:

$$K(x, y)_{\min} = \begin{vmatrix} D_x & D_{xy} \\ D_{yx} & D_y \end{vmatrix},$$

Для исключения недиагонального элемента  $D_{xy}$  ковариационной матрицы  $K(x, y)_{\min}$  при известных элементах  $D_x$ ,  $D_y$  и  $D_{xy}$ , необходимо рассчитать угол поворота  $\gamma$ , который определяется условием [7]:

$$\operatorname{tg} 2\gamma = \frac{2D_{xy}}{D_x - D_y}.$$

При повороте на этот угол изменяются значения дисперсий  $D_x$  и  $D_y$ , характеризующие диагональную ковариационную матрицу, которую обозначим  $K(x, y)_{\min 1}$ , а новые значения дисперсий обозначены  $D_{x1}$  и  $D_{y1}$ , т.е.:

$$K(x, y)_{\min 1} = \begin{vmatrix} D_{x1} & 0 \\ 0 & D_{y1} \end{vmatrix}.$$

Матрицу  $K(x, y)_{\min 1}$  и, следовательно, ее элементы  $D_{x1}$  и  $D_{y1}$  находятся с помощью соотношения [7]:

$$K(x, y)_{\min 1} = G K(x, y)_{\min} G^T,$$

где  $G$  – матрица преобразования, элементы которой, как показано в [7], определяются следующими формулами:

$$g_{11} = g_{22} \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{(D_x - D_y)}{\sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}} \right] \right\}^{1/2},$$

$$g_{21} = -g_{12} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{(D_x - D_y)}{\sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}} \right] \right\}^{1/2}.$$

Следовательно, ковариационная матрица некоррелированных случайных величин  $K(x, y)_{\min 1}$  определяется следующим образом:

$$K(x, y)_{\min 1} = \begin{vmatrix} D_{x1} & 0 \\ 0 & D_{y1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} D_x & D_{xy} \\ D_{yx} & D_y \end{vmatrix} \begin{vmatrix} g_{11} & g_{21} \\ g_{12} & g_{22} \end{vmatrix}.$$

Новые значения дисперсий рассчитываются по формулам:

$$D_{x1} = \frac{1}{2} [D_x + D_y + \sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}];$$

$$D_{y1} = \frac{1}{2} [D_x + D_y - \sqrt{4D_{xy}^2 + (D_x - D_y)^2}].$$

После указанных преобразований выражение двумерной плотности  $f(x, y)$  принимает следующий вид:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{x1}\sigma_{y1}} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\sigma_{x1}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{y1}^2}\right)\right],$$

Значения безопасных областей  $D$  рассчитывается из уравнения:

$$\frac{1}{2\pi\sigma_{x1}\sigma_{y1}} \iint_D \exp\left[-\left(\frac{x^2}{\sigma_{x1}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{y1}^2}\right)\right] dydx = P_d.$$

### **Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению.**

В результате выполненной работы получен способ идентификации ситуации чрезмерного сближения, при возникновении которой судну следует незамедлительно приступить к экстренному маневрированию. Получены аналитические выражения для определения максимальной дистанции кратчайшего сближения и минимально-допустимой дистанции сближения для ситуации, когда область риска столкновения имеет форму эллипса.

В дальнейшем целесообразно разработать способ учета инерционности судна при выявлении ситуации чрезмерного сближения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мальцев А.С. Маневрирование судов при расхождении / Мальцев А.С. – Одесса: Морской тренажерный центр, 2002. – 208 с.
2. Мальцев А.С. Управление движением судна / Мальцев А. С. – Одесса: Весть, 1995.- 230 с.
3. Мальцев А. С. Учет маневренных характеристик для обеспечения безопасности плавания / Мальцев А. С. // Судостроение и ремонт. - 1989. – №5. – С. 29-31.
4. Lamb W. G.P. Colcuiation of the geometry of ship collision zones / Lamb W. G. P. // The Journal of Navigation. – 1989. – 42, № 2. – P. 298 - 305.
5. Goodwin E.M. A Statistical Study of Ship Domains / Goodwin E. M. // The Journal of Navigation. – 1975. - 28, № 3. - P. 328 – 341.
6. Погосов С.Г. Береговые системы управления движением судов/ Погосов С.Г., Москвин Г.И.. – М.: Судовождение и связь, 1976. – 54 с.
7. Крамер Г. Математические методы статистики / Крамер Г. - М.: Мир, 1975, 648 с.