

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СУДНОМ МИНИМИЗАЦИЕЙ КОВАРИАЦИОННОЙ МАТРИЦЫ ВЕКТОРИАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЕГО ПОВОРОТА

Обеспечение безопасности судовождения в стесненных районах плавания является одной из наиболее актуальных проблем безопасности мореплавания. Ее решение ведет к снижению числа навигационных аварий, возникающих из-за посадок судов на мель и навалов на причал.

Повышение точности управления судном, т.е. минимизация векториальных погрешностей, возникающих после завершения поворота, снижает число навигационных аварий. Следовательно, необходимо выявить существенные факторы, влияющие на формирования таких погрешностей, и предупредить их отрицательное влияние на процесс судовождения.

Вопросы формирования векториальных погрешностей поворота судна рассмотрены в работе [1]. К обсуждаемой проблематике также имеют отношение вопросы по оценке надежности судовождения в случае, когда судно следует мимо точечных навигационных опасностей, которые рассмотрены в работе [2], а в работе [3] обоснован критерий навигационной безопасности.

Целью статьи является получение аналитического выражения двумерной плотности распределения векториальной погрешности поворота судна для повышения точности его управления.

Как показано в работе [1], при выполнении поворота судном векториальная погрешность управления судном $S^{(c)}$ является суммой векториальной погрешности $S^{(b)}$, которая возникает из-за погрешности перекладки пера руля $\Delta\beta_k$, и векториальной погрешности $S^{(t)}$, возникающую из-за погрешности выбора момента времени начала поворота Δt_n .

Для динамической модели вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью векториальная погрешность $S^{(b)}$ характеризуется составляющими [1]:

$$S_x^{(b)} = \frac{-V_o}{k \omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \Delta\beta_k,$$

$$S_y^{(\beta)} = \frac{-V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \Delta \beta_k, \quad (1)$$

где K_o и K_y - соответственно курсы судна до и после поворота; V_o - скорость судна; β_k - угол кладки пера руля; k_ω - коэффициент эффективности руля.

В работе [1] показано, что векториальная погрешность $S^{(t)}$ характеризуется составляющими:

$$\begin{aligned} S_x^{(t)} &= V_o \sin K_o \Delta t_n, \\ S_y^{(t)} &= V_o \cos K_o \Delta t_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Для центрированных случайных величин $\Delta \beta_k$ и Δt_n дисперсии обозначены соответственно D_β и D_t . Очевидно, что ковариационная матрица векториальной погрешности $S^{(\beta)}$ при отсутствии корреляции между составляющими принимает вид:

$$K_\beta^S(x, y) = \begin{vmatrix} D_{\beta x}^S & 0 \\ 0 & D_{\beta y}^S \end{vmatrix},$$

где дисперсии составляющих $D_{\beta x}^S$ и $D_{\beta y}^S$ с учетом выражений (1):

$$\begin{aligned} D_{\beta x}^S &= \left[\frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \right]^2 D_\beta; \\ D_{\beta y}^S &= \left[\frac{V_o}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \right]^2 D_\beta. \end{aligned}$$

Ковариационная матрица векториальной погрешности $S^{(t)}$, также полагая независимость ее составляющих, выражается следующим образом:

$$K_t^S(x, y) = \begin{vmatrix} D_{tx}^S & 0 \\ 0 & D_{ty}^S \end{vmatrix}.$$

С учетом соотношений (2) дисперсии составляющих D_{tx}^S и D_{ty}^S погрешности $S^{(t)}$ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} D_{tx}^S &= (V_o \sin K_o)^2 D_t; \\ D_{ty}^S &= (V_o \cos K_o)^2 D_t. \end{aligned}$$

Так как векториальные погрешности $S^{(\beta)}$ и $S^{(t)}$ независимые, то их сумма, т.е. векториальная погрешность управления судном $S^{(c)}$, характеризуется ковариационной матрицей $K_c^S(x, y)$, которая, как показано в работе [4], является суммой ковариационных матриц слагаемых векториальных погрешностей. Поэтому:

$$K_c^S(x, y) = K_\beta^S(x, y) + K_t^S(x, y), \text{ или}$$

$$K_c^S(x, y) = \begin{vmatrix} D_{cx}^S & 0 \\ 0 & D_{cy}^S \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D_{\beta x}^S + D_{tx}^S & 0 \\ 0 & D_{\beta y}^S + D_{ty}^S \end{vmatrix}.$$

Располагая ковариационной матрицей $K_c^S(x, y)$, можно записать выражение для двумерной плотности нормального распределения векториальная погрешность управления судном $S^{(c)}$:

$$f_c^S(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{cx}^S\sigma_{cy}^S} \exp\left[-\left(\frac{x^2}{D_{\beta x}^S + D_{tx}^S} + \frac{y^2}{D_{\beta y}^S + D_{ty}^S}\right)\right],$$

где $\sigma_{cx}^S = \sqrt{D_{\beta x}^S + D_{tx}^S}$, $\sigma_{cy}^S = \sqrt{D_{\beta y}^S + D_{ty}^S}$.

Таким образом, векториальная погрешность управления судном $S^{(c)}$ является суммой независимых векториальных погрешностей $S^{(\beta)}$ и $S^{(t)}$, возникающих из-за неточностей в переключке пера руля и выбора момента времени начала поворота судна.

Ковариационная матрица векториальной погрешности управления судном является суммой ковариационных матриц погрешностей $S^{(\beta)}$ и $S^{(t)}$, а для нормального закона распределения двумерная плотность выражается в явном виде.

Таким образом, повышение точности управления судном возможно минимизацией ковариационной матрицы векториальной погрешности поворота, что требует максимального снижения погрешности переключки пера руля и погрешности выбора момента времени начала поворота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна / Ворохобин И.И., Казак Ю.В. // Судовождение: Сб. научн. трудов. - Вып. 26. / ОНМА, – Одесса: "ИздатИнформ", 2015 – С. 60 – 65.

2. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
3. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения / Мельник Е.Ф. // Судовождение. – 2002. - № 5. – С. 65 - 73.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Вентцель Е.С. - М.: Наука, 1969. - 576 с.