

Зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна

Ю. В. Казак

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-NT2017-148V16-20>

Аннотация. Выявлены факторы, ведущие к появлению векториальных погрешностей поворота судна, которыми являются погрешность перекладки пера руля и погрешность момента времени начала маневра поворота. Получены формулы оценки значений векториальной погрешности поворота судна при появлении погрешности перекладки пера руля и погрешности момента времени начала маневра поворота. Рассмотрена процедура получения плотности погрешности бокового отклонения судна от программной траектории в зависимости от двумерной плотности позиционной векториальной погрешности.

Ключевые слова: безопасность судовождения, векториальная погрешность поворота, погрешность перекладки пера руля, погрешность момента времени начала маневра поворота.

Введение. Обеспечение безопасности судовождения в стесненных районах плавания является одной из наиболее актуальных проблем мореплавания. С ее решением связано снижение числа навигационных аварий, возникающих из-за посадок судов на мель. Вероятность возникновения навигационных аварий можно снизить повышением точности управления судном при выполнении им поворотов, т. е. минимизацией векториальных погрешностей поворота.

Поэтому следует выявить существенные факторы, влияющие на формирования таких погрешностей, и предупредить их отрицательное влияние на процесс судовождения.

Краткий обзор публикаций по теме. В работе [1] впервые предложена оценка надежности судовождения, т. е. влияния позиционной погрешности судна на навигационную безопасность, причем учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна при его прохождении ряда последовательных точечных навигационных опасностей. Дальнейшее развитие этого направления исследований отражено в работах [2, 3], причем в работе [2] рассмотрены два эквивалентные подхода к оценке вероятности безаварийной проводки судна по заданному маршруту, а критерий навигационной безопасности обоснован в работе [3]. Данные работы для оценки навигационной безопасности учитывают только позиционную погрешность при следовании судна прямолинейными участками программной траектории, однако следует также учитывать и векториальную погрешность поворота судна, чему посвящена работа [4]. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики представлены в работе [5], а в работе [6] рассмотрен сравнительный анализ математических моделей вращательного движения судна при повороте.

Вопрос разработки информационной системы имитационного моделирования движения судов со сложными динамическими моделями освещен в работе [7], которая позволит обеспечить новый тип планирования маневров судна и контроль проведения выполняемого маневра с поточным отображением заданного маневра одновременно с фактическим движением судна и с индикацией прогнозируемой траектории.

Цель. Цель настоящей статьи - определить зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна.

Материалы и методы. Векториальная траекторная погрешность поворота судна $S^{(\Sigma)}$ относительно прогнозируемой точки выхода судна на очередной участок программной траектории появляется по причине погрешности перекладки пера руля $\Delta\beta_k$ или погрешности момента времени начала поворота Δt . Вначале рассмотрим векториальную погрешность $S^{(\beta)}$, которая возникает из-за погрешности перекладки пера руля $\Delta\beta_k$. Для этого обратимся к рис. 1. Если угол кладки руля β_k не содержит погрешности, то к концу маневра поворота судно окажется на новом участке программной траектории в точке М и векториальная погрешность $S^{(\beta)}$ не возникает. При наличии погрешности $\Delta\beta_k$ угол кладки руля

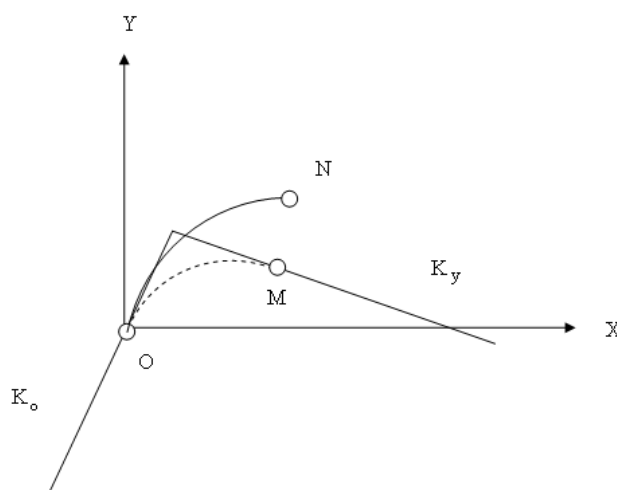


Рис. 1. Возникновение векториальной погрешности $S^{(\beta)}$

равен $\beta_k + \Delta\beta_k$, и к концу маневра, когда судно достигает курса K_y , оно оказывается в точке N. Погрешность $S^{(\beta)}$ определяется величиной отрезка MN, а ее составляющие $S_x^{(\beta)}$ и $S_y^{(\beta)}$ равны:

$$S_x^{(\beta)} = x_N - x_M \text{ и } S_y^{(\beta)} = y_N - y_M, \quad (1)$$

где x_M и y_M - координаты точки М;

x_N и y_N - координаты точки N.

Для определения координат точек М и N рассмотрим динамическую модель вращательного движения судна с постоянной угловой скоростью, согласно которой приращение координат точки М за время поворота определяется выражениями:

$$x_M = \frac{V_0}{k_\omega \beta_k} (\cos K_0 - \cos K_y),$$

$$y_M = \frac{V_0}{k_\omega \beta_k} (\sin K_y - \sin K_0),$$

где k_ω - коэффициент эффективности руля.

Аналогично находим выражения для координат x_N и y_N точки N, учитывая, что угол кладки пера руля увеличился на величину погрешности $\Delta\beta_k$:

$$x_N = \frac{V_0}{k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)} (\cos K_0 - \cos K_y),$$

$$y_N = \frac{V_0}{k_\omega (\beta_k + \Delta\beta_k)} (\sin K_y - \sin K_0).$$

С учетом выражения (1) и того, что $\beta_k \gg \Delta\beta_k$, составляющие $S_x^{(\beta)}$ и $S_y^{(\beta)}$ векториальной погрешности $S^{(\beta)}$ имеют вид:

$$S_x^{(\beta)} = \frac{-V_0}{k_\omega \beta_k^2} (\cos K_0 - \cos K_y) \Delta\beta_k,$$

$$S_y^{(\beta)} = \frac{V_0}{k_\omega \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_0) \Delta\beta_k.$$

Рассмотрим векториальную погрешность $S^{(t)}$, возникающую из-за погрешности момента времени начала поворота Δt (рис. 2).

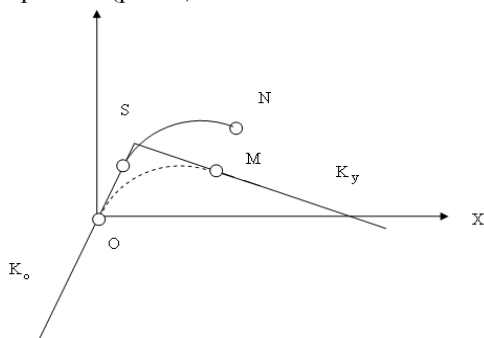


Рис. 2. Формирование векториальной погрешности $S^{(t)}$

Как следует из рис. 2, погрешность $S^{(t)}$ равна отрезку MN, который в свою очередь совпадает по величине с отрезком OS. Поэтому:

$$S^{(t)} = OS = V_0 \Delta t.$$

Составляющие $S_x^{(t)}$ и $S_y^{(t)}$ данной векториальной погрешности имеют вид:

$$S_x^{(t)} = V_0 \sin K_0 \Delta t,$$

$$S_y^{(t)} = V_0 \cos K_0 \Delta t.$$

Векториальная траекторная погрешность поворота судна $S^{(\Sigma)}$ определяется очевидным выражением $S^{(\Sigma)} = S^{(\beta)} + S^{(t)}$.

Результаты и их обсуждение. Для оценки вероятности безаварийного плавания судна P_b по выбранному маршруту, как показано в работе [2], целесообразно использовать математическую модель с одномерной плотностью распределения погрешности бокового отклонения судна от программной траектории движения при заданной двумерной плотности распределения векториальной позиционной погрешности. Поэтому необходимо найти выражение одномерной плотности $f_b(z)$ бокового отклонения z при заданной двумерной плотности распределения $f_t(x, y)$ вероятностей позиционной траекторной погрешности $S^{(\Sigma)}$.

Двумерная плотность $f_t(x, y)$ при нормальном законе распределения может быть представлена системой независимых составляющих x и y , второй смешанных момент которых равен нулю, а ковариационная матрица содержит дисперсии σ_x^2 и σ_y^2 .

На рис. 3 показана зависимость бокового отклонения z от составляющих x и y векториальной позиционной погрешности, а также курса судна K . Из рис. 3 следует:

$$z = x \sin(K - \frac{\pi}{2}) + y \cos(K - \frac{\pi}{2}), \text{ или}$$

$$z = y \sin K - x \cos K.$$

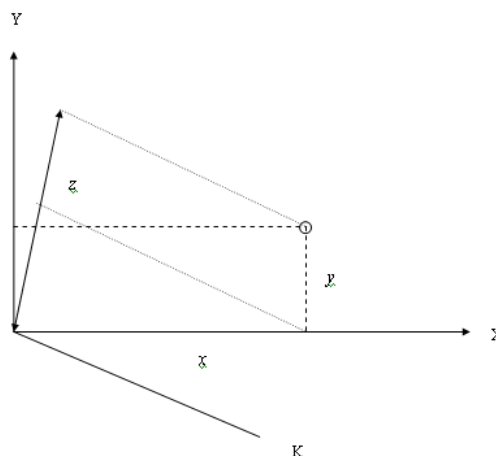


Рис. 3. Зависимость бокового отклонения z от составляющих x и y

В этом случае боковое отклонение z также будет подчиняться нормальному закону с параметрами [8]:

$$m_z = m_y \sin K - m_x \cos K,$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_x^2 \cos^2 K + \sigma_y^2 \sin^2 K,$$

где m_z и σ_z^2 - соответственно математическое ожидание и дисперсия бокового отклонения;

m_x и m_y - математические ожидания составляющих x и y .

Таким образом, выражение для плотности распределения бокового отклонения принимает следующий вид:

$$f_b(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - m_z)^2}{2\sigma_z^2}\right], \text{ или}$$

$$f_b(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_x^2 \cos^2 K + \sigma_y^2 \sin^2 K)}} \exp\left\{-\frac{[z - (m_y \sin K - m_x \cos K)]^2}{2(\sigma_x^2 \cos^2 K + \sigma_y^2 \sin^2 K)}\right\}$$

Выводы

1. Показано, что факторами, которые ведут к появлению векториальных погрешностей поворота судна,

1. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Ворохобин И.И. Эквивалентность оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе / И.И.Ворохобин, В.В. Северин, Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2015. - Вып. 25. – С. 47 - 55.
3. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения/ Мельник Е.Ф.// Судовождение. – 2002. - № 5. – С. 65 - 73.
4. Ворохобин И.И. Векториальные погрешности, возникающие при повороте судна/ И.И.Ворохобин, Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2016. - Вып. 26. – С. 56 - 59.
5. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / И.А.

ЛИТЕРАТУРА

являются погрешности перекладки пера руля и момента времени начала маневра поворота.

2. Получены аналитические выражения для оценки величины векториальной погрешности поворота судна в зависимости от погрешности перекладки пера руля и погрешности момента времени начала маневра поворота.

3. Рассмотрена процедура получения плотности погрешности бокового отклонения судна от программной траектории в зависимости от двумерной плотности позиционной векториальной погрешности.

- Бурмака // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2005. – №10. – С. 21 – 25.
6. Kalinichenko Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning./ Y. Kalinichenko, I. Burmaka//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2016. -6/9 (84). - P. 20 - 31.
7. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.
8. Мудров В.М. Методы обработки измерений/ Мудров В.М., Кушко В.Л. - М.: Советское радио, 1976. -192 с.

REFERENCES

1. Kondrashikhin V.T. Location of ship / Kondrashikhin V.T. - M.: Transport, 1989. – 230s.
2. Vorokhobin I.I. Equivalence of estimation of probability of the accident-free sailing of ship in the straitened district / I.I.Vorokhobin, V.V. Severin, Y.V. Kazak// Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. - 2015.- Vyp. 25. - P. 47 – 55.
3. Melnik E.F. Ground of choice of criterion of navigation safety of navigator/ Melnik E.F.// Sudovozhdenye. – 2002. - № 5. – P. 65 - 73.
4. Vorokhobin I.I. Vektor's errors arising up at the turn of ship/ I.I. Vorokhobin, Y.V. Kazak // Sudovozhdenye: sb. nauchn. trudov. - 2016. - Vyp. 26. - P. 56 – 59.
5. 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.
6. Kalinichenko Y. Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning./ Y. Kalinichenko, I. Burmaka//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 2016. -6/9 (84). - P. 20 - 31.
7. K. Benedict. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf, S. Klaes// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 8, № 1, page 131-141, 2014.
8. Mudrov V.M. Methods of treatment of measurings / Mudrov V.M., Kushko V.L. - M.: Sovetskoe radio, 1976. -192 p.

Зависимость погрешности бокового отклонения судна от траекторной погрешности поворота судна

Ю. В. Казак

Аннотация. Выявлены факторы, ведущие к появлению векториальных погрешностей поворота судна, которыми являются погрешность перекладки пера руля и погрешность момента времени начала маневра поворота. Получены формулы оценки значений векториальной погрешности поворота судна при появлении погрешности перекладки пера руля и погрешности момента времени начала маневра поворота. Рассмотрена процедура получения плотности погрешности бокового отклонения судна от программной траектории в зависимости от двумерной плотности позиционной векториальной погрешности.

Ключевые слова: безопасность судовождения, векториальная погрешность поворота, погрешность перекладки пера руля, погрешность момента времени начала маневра поворота.

Dependence of the error of the lateral deviation of the vessel from the trajectory error of the turn of the vessel

Yu. V. Kazak

Abstract. Factors leading to the appearance of vectorial errors in the turning of the vessel are identified, which are the error in the shifting of the rudder pen and the error in the time of the start of the turn maneuver. Formulas for estimating the values of the vector error of the turning of the vessel are obtained with the appearance of an error in the shift of the rudder pen and the error in the time of the start of the turn maneuver. The procedure for obtaining the error density of the ship's lateral deviation from the program trajectory is considered depending on the two-dimensional density of the positional vector error.

Keywords: safety of navigation, vectorial error of turn, error of rudder shift, error of the moment of the beginning of the turn manoeuvre.