

Траекторная погрешность поворота судна и способы снижения ее величины

И. И. Ворохобин, Ю. В. Казак, В. В. Северин

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

Paper received 20.06.17; Revised 26.06.17; Accepted for publication 28.06.17.

Аннотация. Предложена процедура определения величины векториальной погрешности поворота судна, возникающая из-за погрешности перекладки пера руля и зависящая от выбранной динамической модели вращательного движения судна. Получены аналитические выражения для оценки величины векториальной погрешности для двух динамических моделей вращательного движения судна и приведены численные примеры. Показано, что суммарная векториальная погрешность поворота в случае использования модели второго порядка в четыре раза меньше, чем при простейшей динамической модели.

Ключевые слова: безопасность судовождения, векториальная погрешность поворота, динамическая модель вращательного движения, погрешность перекладки пера руля.

Введение. При плавании в стесненных районах судну следует удерживаться на заблаговременно выбранной программной траектории движения, которая обеспечивает его безопасное следование относительно навигационных опасностей. При этом непрерывно осуществляется контроль места судна относительно программной траектории и периодически корректируется его курс для минимизации отклонений обсервованного места от программного пути. Влияние неизбежных погрешностей обсервации и счисления, а также возмущающих факторов, ведет к тому, что истинное положение судна не совпадает с программной траекторией, вследствие чего и возникает случайная позиционная векториальная погрешность. Наличие такой погрешности может повести, например, к посадке судна на мель или к дугой навигационной аварии. Поэтому одним из аспектов, способствующих повышению безопасности судовождения, является снижение величины позиционной погрешности судна, чем уменьшается риск возникновения навигационной аварийности.

Краткий обзор публикаций по теме. Рост грузоподъемности современных судов для обеспечения их безопасного плавания, как отмечается в работе [1], вызывает необходимость применения усовершенствованных компьютерных систем, в которых используются средства прогноза движения судов, успешно применявшиеся в течение длительного времени, однако отличающиеся упрощением моделей прогноза движения судна. Указанное обстоятельство ограничивает их использование в части немедленного отображения движения судна при изменении положения руля и оборотов двигателя. Требуемая точность реализации криволинейной траектории движения судна может быть обеспечена более усовершенствованными прогнозными моделями движения судна.

Вопросам идентификации судовых моделей маневрирования, которые являются ключом к исследованию маневренности судна, проектированию систем управления движением судов и развитию систем управления судовыми тренажерами, посвящена работа [2]. В данной работе на основе анализа гидродинамики судна сформирована нелинейная модель маневрирования судна. Теория идентификации систем используется для оценки параметров модели, для расчета которых предлагается алгоритм, основанный на расширенной теории фильтра Калмана. Для получения входных и выходных данных системы, которые необходимы для идентификации параметров эксперимента, использовались циркуляция и

зигзагообразный маневр, которые выполняются на имитаторе управления судном. С помощью этого алгоритма устраняются погрешности, внесенные во время процесса измерения.

В работе [3] автор рассматривает интеллектуальную систему прогнозирования движения судна, которая имитирует процесс обучения автономного блока управления, созданного с помощью искусственной нейронной сети. Блок управления наблюдает входные сигналы и вычисляет значения требуемых параметров маневрирования судна в стесненных водах. Основной задачей системы является непрерывный контроль навигационных параметров судна и прогноз их значений после определенного интервала времени. Результат прогнозирования может использоваться, как предупреждение судоводителя о возникающей угрозе.

В работе [4] освещается вопрос разработки информационной системы имитационного моделирования движения судов со сложными динамическими моделями, которые учитывают угол кладки пера руля и обороты двигателя. Указывается, что данная система позволит обеспечить новый тип планирования маневров судна и контроль реализации заданного маневра. В процессе маневрирования предусмотрено отображение заданного маневра одновременно с фактическим движением судна и с индикацией прогнозируемой траектории, которая определяется реальными входными данными от датчиков судна. Следует отметить, что такая система решает прямую задачу отображения прогнозируемой траектории по заданным параметрам маневра, хотя актуальной является обратная задача определения параметров предстоящего маневра по заданной программной траектории движения с учетом динамической модели прогноза движения судна. По динамической модели рассчитываются параметры поворота судна, а после его завершения возникает векториальная погрешность поворота, величина которой в определяющей мере зависит от степени адекватности динамической модели реальному криволинейному движению судна в процессе маневра.

Оценка влияния позиционной погрешности судна на навигационную безопасность впервые рассматривались в работе [5], причем учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна. Дальнейшее развитие этого вопроса получило в работах [6, 7], причем в работе [6] обоснован критерий навигационной безопасности, а в работе [7] рассмотрены разные подходы к оценке вероятности безаварийного плавания судна по заданному стесненному маршруту и по

казана их эквивалентность. В анализируемых работах для оценки навигационной безопасности учитывается только позиционная погрешность при следовании судна на прямолинейных участках программной траектории. Однако помимо позиционной погрешности при плавании в стесненных водах следует также учитывать и векториальную погрешность поворота судна.

Цель. Цель настоящей статьи - описание механизма возникновения векториальной погрешности поворота судна и оценка ее возможной величины.

Материалы и методы. При повороте судна векториальная погрешность относительно прогнозируемой точки выхода судна на новый курс может появиться из-за погрешности перекладки пера руля $\Delta\beta_k$ или погрешности в определении момента времени начала поворота [8]. Рассмотрим векториальную погрешность S , 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 M и векториальная погрешность S будет отсутствовать.

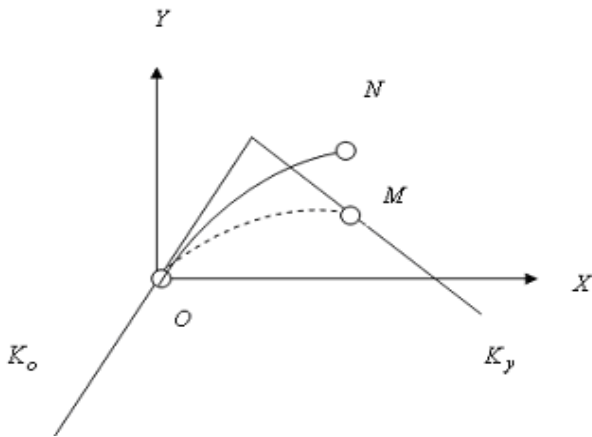


Рис. 1. Векториальная погрешность S

В случае наличия погрешности $\Delta\beta_k$, кладка пера руля составит угол $\beta_k + \Delta\beta_k$ и в завершении маневра, когда судно ляжет на курс K_y , оно оказывается в точке N . Погрешность S определяется величиной отрезка MN с координатами x и y :

$$x = x_N - x_M \text{ и } y = y_N - y_M, \quad (1)$$

где x_M и y_M - координаты точки M ; x_N и y_N - координаты точки N .

Очевидно, величина векториальной погрешности поворота $S = \sqrt{(x_N - x_M)^2 + (y_N - y_M)^2}$.

Для оценки величины погрешности S необходимо найти ее составляющие x и y , которые определяются динамической моделью вращательного движения судна при повороте. В работе [9] анализируются динамические модели вращательного движения судна с разной степенью адекватности реальному процессу поворота. Здесь же для демонстрации механизма формирования векториальной погрешности S рассмотрим две наиболее простые модели вращательного движения судна.

Приведем простейшую динамическую модель первого порядка, которая описывает поворот судна с постоян-

ной угловой скоростью и характеризуется следующим уравнением изменения курса:

$$\dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

где k_{ω} - коэффициент эффективности руля.

Очевидно, с учетом обозначения $k_{\omega} \beta_k = a_{\omega}$ данное уравнение имеет следующее решение:

$$K = K_o + a_{\omega} t, \quad (2)$$

причем длительность поворота судна

$$\tau = \frac{\Delta K}{k_{\omega} \beta_k},$$

где $\Delta K = K_y - K_o$.

Рассмотрим случай, когда поворот судна прогнозируется по более адекватной реальному процессу поворота динамической модели вращательного движения судна, которая описывается дифференциальным уравнением второго порядка:

$$T_1 \dot{\dot{K}} + \dot{K} = k_{\omega} \beta_k,$$

где T_1 - постоянная времени, характеризующая инерционные свойства судна.

Решение приведенного дифференциального уравнения имеет следующий вид:

$$K = K_o + \omega_r t - T_1 (\omega_r - \omega_o) [1 - \exp(-t/T_1)], \quad (3)$$

где ω_o и ω_r - соответственно начальное значение угловой скорости поворота и частное решение исходного дифференциального уравнения.

Поворот судна содержит две фазы кладки пера руля. На первой фазе, в начальный момент времени производится перекладка руля на угол β_k и руль удерживается

в таком положении в течение интервала времени Δt_k . Затем руль переключается на противоположный борт на ту же величину и гасится инерция поворота судна в течение интервала времени Δt , по истечению которого судно выходит на заданный курс, угловая скорость поворота обращается в нуль, а перо руля приводится в диаметрально плоскость судна.

На первой фазе поворота начальное ω_o и установившееся ω_r значения угловой скорости: $\omega_o = 0$ и $\omega_r = k_{\omega} \beta_k = a_{\omega}$.

В этом случае выражение (3) приобретает следующий вид:

$$K = K_o + a_{\omega} \{ t - T_1 [1 - \exp(-t/T_1)] \}. \quad (4)$$

На второй фазе поворота происходит перекладка руля на противоположный борт на угол $-\beta_k$ и происходит одерживание судна. Для этой фазы поворота значение текущего курса:

$$\tilde{K} = K + a_{\omega} \{ T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k/T_1)] [1 - \exp(-t/T_1)] - t \}. \quad (5)$$

Интервалы времени Δt_k и Δt вычисляются с учетом требований поворота на заданное приращение курса ΔK , а также обращение в нуль угловой скорости на момент времени выхода на новый курс и аналитически выражается следующим образом:

$$\Delta K = K(\Delta t_k) + \tilde{K}(\Delta t); \quad (6)$$

$$\omega(\Delta t_k, \Delta t) = 0. \quad (7)$$

Уравнение (6) с учетом выражений (4) и (5) принимает вид:

$$\Delta K = a_{\omega} \{ \Delta t_k - T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \} + a_{\omega} \{ T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] \} \times \rightarrow [1 - \exp(-t / T_1)] - \Delta t \},$$

из которого получаем выражение расчета методом простых итераций:

$$\Delta t_k = T_1 [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] + \Delta t - T_1 [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)] [1 - \exp(-\Delta t / T_1)] + \Delta K / a_{\omega} \quad (8)$$

В качестве начального приближения принимаем из простейшей модели $\Delta t_k = \Delta K / a_{\omega}$.

Из уравнения (7) с учетом угловых скоростей на второй фазе поворота $\omega_{\omega} = a_{\omega} [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)]$ и $\omega_r = -a_{\omega}$ получим:

$$[2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)]^{-1} = \exp(-\Delta t / T_1).$$

Логарифмируем обе части последнего уравнения

$$\Delta t = T_1 \ln [2 - \exp(-\Delta t_k / T_1)].$$

Последнее полученное уравнение позволяет связать переменные Δt_k и Δt , чем обеспечивается итерационное вычисление длительностей каждой из фаз поворота судна, а также длительности поворота τ с одного заданного курса судна на другой.

Результаты и их обсуждение. Найдем выражения для расчета координат точек M и N в зависимости от рассмотренных динамических моделей вращательного движения судна. В случае простейшей динамической модели с учетом выражения (2) координаты точки M :

$$x_M = \int_0^{\tau} V_o \sin [K_o + a_{\omega} t] dt = V_o \sin K_o \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt + V_o \cos K_o \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt;$$

$$y_M = \int_0^{\tau} V_o \cos (K_o + a_{\omega} t) dt = V_o \cos K_o \int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt - V_o \sin K_o \int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt.$$

Так как

$$\int_0^{\tau} \sin(a_{\omega} t) dt = -\frac{1}{a_{\omega}} \cos a_{\omega} t \Big|_0^{\tau} = -\frac{1}{a_{\omega}} [\cos a_{\omega} \tau - 1]$$

$$\int_0^{\tau} \cos(a_{\omega} t) dt = \frac{1}{a_{\omega}} \sin a_{\omega} t \Big|_0^{\tau} = \frac{1}{a_{\omega}} \sin a_{\omega} \tau$$

то с учетом $a_{\omega} \tau = \Delta K$ и $K_o + \Delta K = K_y$, окончательно получим:

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

$$y_M = \frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k} (\sin K_y - \sin K_o).$$

аналогично находим координаты точки N :

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

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

Согласно (1) составляющие x и y векториальной погрешности принимают вид:

$$x = \frac{V_o}{k_{\omega}} (\cos K_o - \cos K_y) \left[\frac{1}{(\beta_k + \Delta \beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right],$$

$$y = \frac{V_o}{k_{\omega}} (\sin K_y - \sin K_o) \left[\frac{1}{(\beta_k + \Delta \beta_k)} - \frac{1}{\beta_k} \right].$$

Учитывая, что $\beta_k \gg \Delta \beta_k$,

$$x = -\frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k^2} (\cos K_o - \cos K_y) \Delta \beta_k,$$

$$y = -\frac{V_o}{k_{\omega} \beta_k^2} (\sin K_y - \sin K_o) \Delta \beta_k. \quad (9)$$

В случае описания вращательного движения судна при повороте второй динамической моделью координаты точки M определяются выражениями:

$$x_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \sin K dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin \tilde{K} dt, \quad (10)$$

$$y_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \cos K dt + \int_0^{\Delta t} V_o \cos \tilde{K} dt, \quad (11)$$

причем в выражениях (4), (5) и (8) применяем $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$.

Аналогично находятся выражения для координат x_N и y_N точки N , только при их расчете по формулам (10) и (11) выбираем значение $a_{\omega} = k_{\omega} (\beta_k + \Delta \beta_k)$. При расчете координат определенные интегралы, которые входят в эти формулы, не выражаются в элементарных функциях и их значения находятся методами численно-го интегрирования.

Произведем количественную оценку величины векториальной погрешности поворота S в зависимости от выбранной модели прогноза поворота судна. Допустим, судно следует со скоростью $V_o = 20$ узлов курсом $K_o = 15^\circ$ и выполняет поворот на курс $K_y = 105^\circ$. Угол перекладки пера руля выбран $\beta_k = 15^\circ$ и судно выполняет поворот с угловой скоростью $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k = 2,7$ град/с с постоянной времени $T_1 = 10,23$ с [10]. При пере-

кладке руля была допущена погрешность $\Delta \beta_k = 1^\circ$. Рассчитаем векториальную погрешность S в случае прогноза поворота по простейшей модели первого порядка, для чего воспользуемся выражениями (9). Переводя градусную меру в радианную и выражая скорость судна в м/с, рассчитываем проекции x и y векториальной погрешности S :

$$x = \frac{-0,514 \cdot 20}{0,262 \cdot 0,1745 \cdot 2,7} (1,225) 0,1745 = -17,80 \text{ м},$$

$$y = \frac{-0,514 \cdot 20}{0,262 \cdot 2,7} (0,7071) = -10,27 \text{ м}.$$

Продолжительность поворота равна $\tau = 33,3$ с, а величина векториальной погрешности составляет $S = 20,6$ м.

При этих же исходных данных при прогнозе поворота судна по динамической модели второго порядка вначале методом простых итераций были рассчитаны продолжительности первой и второй фаз поворота судна $\Delta t_k = 38$ с и $\Delta t = 7$ с и продолжительностью поворота $\tau = 45$ с. Численным интегрированием были определены координаты точки M : $x_M = 348$ м и $y_M = 235$ м, а также координаты точки N : $x_N = 333$ м, $y_N = 222$ м. Проекция векториальной погрешности $x = -15$ м, $y = -13$ м, а погрешность $S = 19,8$ м.

Следует отметить, что реальное значение векториальной погрешности значительно больше, что обуславливается отличием реальной угловой скорости поворота судна от значений, рассчитанных с помощью моделей прогноза поворота судна. Так, в работе [9] указывается, что были выполнены натурные наблюдения траекторий поворота судна, на базе которых производилось имитационное моделирование поворота на 90° и было уста-

новлено, что при использовании для прогноза криволинейного участка математической модели с постоянной угловой скоростью траекторная погрешность, т. е. максимальное расхождение экспериментальной и модельной траекторий, составила порядка 150 ... 200 м, для модели второго порядка эта величина составила 35 ... 40 м.

Таким образом, в приведенном примере значения векториальной погрешности, рассчитанные при прогнозе поворота судна по простейшей модели первого порядка и модели второго порядка, незначительно отличаются друг от друга, однако с учетом реальной криволинейной траектории поворота суммарная векториальная погрешность в первом случае прогноза может достигать до 220 м, а случае прогноза поворота по модели второго порядка - до 60 м, т. е. примерно в четыре раза меньше. Следовательно, для прогноза поворота судна предпочтительно пользоваться моделью второго порядка.

Выводы

1. Получена процедура определения величины векториальной погрешности поворота судна, возникающая

из-за погрешности в переключке пера руля и зависящая от выбранной динамической модели вращательного движения судна.

2. Для оценки влияния динамической модели вращательного движения судна на величину векториальной погрешности поворота приведены две динамические модели, описывающие изменение курса судна при повороте, и позволяющие получить основные характеристики поворота.

3. Получены аналитические выражения для оценки величины векториальной погрешности поворота судна в зависимости от погрешности переключки пера руля для двух динамических моделей вращательного движения судна и приведены численные примеры.

4. Показано, что суммарная векториальная погрешность поворота судна в случае прогноза вращательного движения по простейшей динамической модели может достигать до 220 м, а случае прогноза поворота по модели второго порядка - до 60 м, т. е. примерно в четыре раза меньше. Рекомендуется для прогноза поворота судна использовать модель второго порядка.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Benedict. Manoeuvring Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators/ K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Baldauf // TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 25-30, 2009.
2. C.J. Shi. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters/ C.J. Shi, D. Zhao, J. Peng, C. Shen// TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 3, № 1, page 105-110, 2009.
3. M. Ljacki. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering / M. Ljacki // International magazine on marine navigation and safety of marine transport, Vol. 10, № 3, page 511-516, 2016.
4. 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.
5. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
6. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения/ Мельник Е.Ф.// Судовождение. – 2002. - № 5. – С. 65 - 73.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Бурмака И.А. Результаты имитационного моделирования процесса расхождения судов с учетом их динамики / И.А. Бурмака // Судовождение: сб. научн. трудов. – 2005. – №10. – С. 21 – 25.

REFERENCES

5. Kondrashikhin V.T. Location of ship / Kondrashikhin V.T. - M.: Transport, 1989. – 230s.
6. Melnik E.F. Ground of choice of criterion of navigation safety of navigator/ Melnik E.F.// Sudovozhdenye. – 2002. - № 5. – P. 65 - 73.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.

Trajectory error of turn of ship and methods of decline of its size

I. I. Vorokhobin, Y. V. Kozak, V. V. Severin

Abstract. Procedure of determination of size of vector's error of turn of ship is offered, arising up from the error of position of helm and depending on the chosen dynamic model of rotator motion of ship. Analytical expressions are got for estimation of size of vector's error for two dynamic models of rotator motion of ship and numeral examples are resulted. It is shown that total vector's error of turn in the case of the use of model of the second order in four times less, than at the simplest dynamic model.

Keywords: safety of navigator, vector's error of turn, dynamic model of rotator motion, error of position of feather helm.