

ОЦЕНКА ВЕКТОРИАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПОВОРОТА СУДНА И МИНИМИЗАЦИЯ ЕЕ ВЕЛИЧИНЫ

При плавании в стесненных водах судно должно удерживаться на программной траектории движения, которая выбирается заблаговременно и обеспечивает безопасное следование судна относительно навигационных опасностей. При этом непрерывно осуществляется контроль места судна относительно программной траектории и в случае необходимости корректируется его курс для минимизации отклонений обсервованного места от программного пути. Из-за неизбежных погрешностей обсервации и счисления, а также влияния возмущающих факторов, истинное положение судна не совпадает с программной траекторией и возникает позиционная векториальная погрешность, которая носит случайный характер и может повести, например, к посадке на мель или к дугой навигационной аварии.

Одним из аспектов, способствующих повышению безопасности судовождения, является снижение величины позиционной погрешности судна, чем уменьшается риск возникновения навигационной аварийности. Оценка ее влияния на навигационную безопасность впервые рассматривались в работе [1], причем учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна. Дальнейшее развитие этого вопроса получило в работах [2, 3], причем в работе [2] обоснован критерий навигационной безопасности. В работе [3] рассмотрены разные подходы к оценке вероятности безаварийного плавания судна по заданному стесненному маршруту и показана их эквивалентность. В анализируемых работах для оценки навигационной безопасности учитывается только позиционная погрешность при следовании судна на прямолинейных участках программной траектории.

Однако при переходе судна на очередной линейный участок программной траектории выполняется поворот, и судно следует криволинейной траекторией. При этом необходимо рассчитать момент времени начала поворота с заданным углом кладки пера руля, для чего следует располагать моделью криволинейного движения судна для прогноза траектории поворота. Судно при выходе на новый курс будет иметь векториальную погрешность поворота, величина которой зависит от степени адекватности модели прогноза поворота реальной криволинейной траектории движения судна. Следовательно, помимо по-

зиционной погрешности при плавании в стесненных водах следует также учитывать и векториальную погрешность поворота судна.

Цель статьи – оценка векториальной погрешности поворота судна, которая возникает из-за погрешности угла кладки пера руля, и минимизация ее величины выбором модели прогноза поворота судна.

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 [4]. Рассмотрим векториальную погрешность S , которая возникает из-за погрешности $\Delta\beta_k$, имеющую дисперсию D_β . 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.

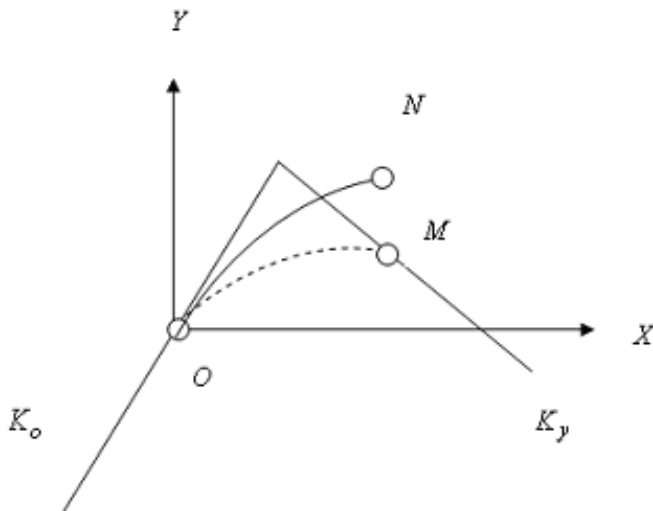


Рис. 1. Векториальная погрешность S

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 .

Вначале рассмотрим ситуацию, когда прогноз поворота судна производится по простейшей динамической модели первого порядка, которая описывает поворот судна с постоянной угловой скоростью и характеризуется следующим уравнением изменения курса:

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

где k_{ω} – коэффициент эффективности руля.

Очевидно, данное уравнение имеет следующее решение:

$$K = K_o + k_{\omega} \beta_k t .$$

Длительность поворота судна

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

где $\Delta K = K_y - K_o$.

Точка M имеет координаты:

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

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

где $a_{\omega} = k_{\omega} \beta_k$.

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:

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

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

Координаты точки N находим аналогично:

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

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

Согласно (1) составляющие x и y векториальной погрешности имеют 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 $\beta_k \gg \Delta\beta_k$,

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

Рассмотрим случай, когда поворот судна прогнозируется по более адекватной реальному процессу поворота динамической модели вращательного движения судна, которая описывается дифференциальным уравнением второго порядка [5]:

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

где T_1 – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства судна.

Решение приведенного дифференциального уравнения имеет следующий вид [6]:

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

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. Сначала, 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 перекалывается 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 диаметральной плоскости судна.

Найдем выражения для курса судна на первой и второй фазах поворота. На первой фазе поворота, длительность которой составляет интервал времени Δt_k , 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 - β_k и в течение интервала времени Δt 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:

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

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 $\omega_o = a_\omega [1 - \exp(-\Delta t_k / T_1)]$ и $\omega_r = -a_\omega$ получим:

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

Логарифмируя обе части последнего уравнения, получим:

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

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.

Координаты точки M определяются выражениями:

$$x_M = \int_0^{\Delta t_k} V_o \sin K dt + \int_0^{\Delta t} V_o \sin \tilde{K} dt, \quad (9)$$

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

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 (9) и (10) 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 численного 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 [7]. При перекладке 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 (2). 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 [8] указывается, что были выполнены натурные наблюдения траекторий поворота судна, на базе которых производилось имитационное моделирование поворота на 90° и было установлено, что при использовании для прогно-

за 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, 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / Кондрашихин В.Т. - М.: Транспорт, 1989. – 230 с.
2. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения // Судовождение. – 2002. - № 5. – С. 65 - 73.
3. 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.
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. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления/ Л.Л. Вагущенко - Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.
6. Казак Ю.В. Влияние погрешности перекладки пера руля на точность поворота судна/ Ю.В. Казак // Судовождение: сб. научн. трудов ОНМА, - 2017. - Вып. 27. – С. 71 - 76.
7. 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.
8. 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.