

УДК 656.61.052.484

TRAJECTORY ERROR OF A SHIP MOTION CURVILINEAR AREA PROGNOSIS

ТРАЕКТОРНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ПРОГНОЗА КРИВОЛИНЕЙНОГО УЧАСТКА ДВИЖЕНИЯ СУДНА

E.P. Chapchay, captain, PhD

Е.П. Чапчай, к.д.п., к.т.н.

Odessa National Maritime Academy, Ukraine

Одесская Национальная Морская Академия, Украина

ABSTRACT

A trajectory error on setting at the moment of manoeuvre ending is examined. Latter appears due to differences between forecasted and real trajectories. An error depends on the accuracy of a mathematical model used to forecast trajectory. Estimation method of mentioned error is given in the paper.

Key words: safety of navigation, constrained waters, trajectory error, models of turn.

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

Плавание судов в стесненных водах требует тщательного учета возникающих траекторных погрешностей, которые в первую очередь определяются степенью адекватности математической модели его вращательного движения реальному процессу поворота и принимают существенные значения на криволинейных участках движения судна.

Оценка величины траекторной погрешности при вычислении начала поворота судна по различным математическим моделям вращательного движения на базе экспериментальных наблюдений является актуальным научным вопросом, которому посвящена настоящая статья

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

Работы [1-3] посвящены вопросам использования математических моделей поворотливости судна для обеспечения безопасного плавания судна с учетом его инерционности. Так, в работе [1] вращательное движение судна описывается дифференциальными уравнениями второго и третьего порядков, с помощью которых в работе [2] производится выбор маневра расхождения судна с опасной целью, предполагая, что перекладка пера руля производится мгновенно. В работе [3] рассмотрена математическая модель поворотливости судна с учетом времени продолжительности перекладки пера руля, позволяющая производить оценку величины траекторной погрешности.

Формулировка целей статьи (постановка задачи)

Целью данной статьи является рассмотрение траекторной погрешности судна и ее экспериментальная оценка.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

При повороте реальная траектория движения судна отличается от прогнозируемой траектории, которая в значительной мере определяется математической моделью, по которой производится расчет прогнозируемого криволинейного участка. Поэтому в момент окончания поворота возникает траекторная погрешность прогноза движения судна Δ_t , которая может рассматриваться, как методическая и может быть оценена в первом приближении при допущении постоянства скорости судна и принятой математической модели изменения курса судна при повороте.

Траекторная погрешность Δ_t определяется известным соотношением:

$$\Delta_t = \sqrt{dX_t^2 + dY_t^2},$$

где dX_t и dY_t - проекции траекторной погрешности.

В свою очередь проекции dX_t и dY_t являются разностями между координатами конечных точек P1 и P2 прогнозируемого и реализовавшегося криволинейных участков поворота судна. Обозначим приращение координат за время маневрирования судна для реализовавшейся траектории через ΔX_r и ΔY_r , а для прогнозируемой - через ΔX_p и ΔY_p . В этом случае справедливы соотношения:

$$dX_t = \Delta X_r - \Delta X_p; \quad dY_t = \Delta Y_r - \Delta Y_p.$$

Приращение координат судна за время маневрирования ΔX и ΔY находится интегрированием составляющих его скорости на координатные оси:

$$\Delta X = \int_0^{\tau_p} V \sin(\psi_t) dt; \quad \Delta Y = \int_0^{\tau_p} V \cos(\psi_t) dt, \quad (1)$$

где ψ_t - текущее значение курса судна, определяющееся выражением:

$$\psi_t = \psi_0 + \int_0^t \omega d\tau = \psi_0 + \tilde{\psi}_t,$$

которое при подстановке в (1) дает:

$$\Delta X = \int_0^{\tau_p} V \sin(\psi_o + \tilde{\psi}_t) dt; \Delta Y = \int_0^{\tau_p} V \cos(\psi_o + \tilde{\psi}_t) dt. \quad (2)$$

Полагая в первом приближении, что скорость судна V не изменяется, выражения (2) можно записать:

$$\begin{aligned} \Delta X &= V \sin \psi_o \int_0^{\tau_p} \cos \tilde{\psi}_t dt + V \cos \psi_o \int_0^{\tau_p} \sin \tilde{\psi}_t dt; \\ \Delta Y &= V \cos \psi_o \int_0^{\tau_p} \cos \tilde{\psi}_t dt - V \sin \psi_o \int_0^{\tau_p} \sin \tilde{\psi}_t dt. \end{aligned}$$

С учетом полученных выражений можно записать выражения для приращения координат ΔX_r и ΔY_r реального поворота и ΔX_p и ΔY_p прогнозируемого:

$$\begin{aligned} \Delta X_r &= V \sin \psi_o \int_0^{\tau_{pr}} \cos \tilde{\psi}_{tr} dt + V \cos \psi_o \int_0^{\tau_{pr}} \sin \tilde{\psi}_{tr} dt; \\ \Delta Y_r &= V \cos \psi_o \int_0^{\tau_{pr}} \cos \tilde{\psi}_{tr} dt - V \sin \psi_o \int_0^{\tau_{pr}} \sin \tilde{\psi}_{tr} dt; \\ \Delta X_p &= V \sin \psi_o \int_0^{\tau_{pp}} \cos \tilde{\psi}_{tp} dt + V \cos \psi_o \int_0^{\tau_{pp}} \sin \tilde{\psi}_{tp} dt; \\ \Delta Y_p &= V \cos \psi_o \int_0^{\tau_{pp}} \cos \tilde{\psi}_{tp} dt - V \sin \psi_o \int_0^{\tau_{pp}} \sin \tilde{\psi}_{tp} dt, \end{aligned}$$

где τ_{pr} и τ_{pp} - продолжительность поворота судна соответственно по реальной и прогнозируемой моделях;

$\tilde{\psi}_{tr}$ и $\tilde{\psi}_{tp}$ - изменение курса судна при повороте соответственно по реальной и прогнозируемой моделях.

Для дальнейшего удобства записей введем следующие обозначения:

$$S_o = V \sin \psi_o; C_o = V \cos \psi_o;$$

$$J_{sr} = \int_0^{\tau_{pr}} \sin \tilde{\psi}_{tr} dt; \quad J_{cr} = \int_0^{\tau_{pr}} \cos \tilde{\psi}_{tr} dt;$$

$$J_{sp} = \int_0^{\tau_{pp}} \sin \tilde{\psi}_{tp} dt; \quad J_{cp} = \int_0^{\tau_{pp}} \cos \tilde{\psi}_{tp} dt.$$

С учетом принятых обозначений искомые приращения координат принимают следующий вид:

$$\Delta X_r = S_o J_{cr} + C_o J_{sr}; \quad \Delta Y_r = C_o J_{cr} + S_o J_{sr};$$

$$\Delta X_p = S_o J_{cp} + C_o J_{sp}; \quad \Delta Y_p = C_o J_{cp} + S_o J_{sp}.$$

Выражения для проекций траекторной погрешности принимают следующий вид:

$$dX_t = S_o J_{cr} + C_o J_{sr} - (S_o J_{cp} + C_o J_{sp});$$

$$dY_t = C_o J_{cr} + S_o J_{sr} - (C_o J_{cp} + S_o J_{sp}), \text{ или}$$

$$dX_t = S_o (J_{cr} - J_{cp}) + C_o (J_{sr} - J_{sp});$$

$$dY_t = C_o (J_{cr} - J_{cp}) + S_o (J_{sr} - J_{sp}).$$

Если обозначить $\Delta J_c = J_{cr} - J_{cp}$ и $\Delta J_s = J_{sr} - J_{sp}$, то:

$$dX_t = S_o \Delta J_c + C_o \Delta J_s;$$

$$dY_t = C_o \Delta J_c - S_o \Delta J_s.$$

Если учесть, что $S_o^2 + C_o^2 = V^2$, то получим выражение для траекторной погрешности Δ_t :

$$\Delta_t = V \sqrt{\Delta J_c^2 + \Delta J_s^2}.$$

Так как:

$$\Delta J_c = \int_0^{\tau_{pr}} \cos \tilde{\psi}_{tr} dt - \int_0^{\tau_{pp}} \cos \tilde{\psi}_{tp} dt \quad \text{и} \quad \Delta J_s = \int_0^{\tau_{pr}} \sin \tilde{\psi}_{tr} dt - \int_0^{\tau_{pp}} \sin \tilde{\psi}_{tp} dt,$$

то можно сделать заключение, что аналитическое выражение для траекторной погрешности Δ_t однозначно определяется моделями, описывающими реальное $\tilde{\psi}_{tr}$ и прогнозируемое $\tilde{\psi}_{tp}$ изменение курса судна в процессе его поворота.

Для учета степени влияния времени перекладки руля на величину траекторной погрешности в реальных условиях эксплуатации контейнеровоза «ShailaAnn» были получены экспериментальные материалы по его поворотливости.

При натуральных наблюдениях поступали следующим образом. Перед перекладкой пера руля с помощью DGPS начинался процесс регистрации координат текущего места судна с интервалом 2÷3 с. Затем фиксировался момент начала и длительность перекладки пера руля, а также величина угла перекладки, как вначале поворота, так и при одерживании. Траектория поворота судна представлена не менее сотней точек. Были получены материалы, характеризующие три траектории поворота судна.

Для описания прогнозируемой траектории поворота использовались пять математических моделей поворотливости судна разной степени точности. Наиболее простой является первая модель, которая учитывает поворот судна с постоянной угловой скоростью. Вторая модель учитывает инерционность судна с помощью основной постоянной времени, а третья модель содержит две постоянные времени. Четвертая и пятые модели соответствуют второй и третьей моделям, однако учитывают время перекладки руля.

С помощью экспериментальных траекторий производилась параметрическая идентификация моделей вращательного движения судна, а затем производился расчет прогнозируемой траектории, после чего по последним точкам экспериментальной и прогнозируемой траекторий находится траекторная погрешность.

При расчете прогнозируемых траекторий поворота надлежит учитывать две фазы его поворота при выполнении маневра.

В дальнейшем для каждой из пяти типов математических моделей рассчитывались все три траектории движения судна, причем для каждой экспериментальной точки вычислялась модельная точка в соответствующий момент времени. Находилась расстояние между экспериментальной и модельной точкой, которое служило для расчета с.к.о. ΔL модельной траектории от экспериментальной, также для последней точки каждой траектории рассчитывалось значение траекторной погрешности S_b , как расстояние между модельной и экспериментальной точками в конце маневра.

Анализ приведенной таблицы показывает, что наилучшее соответствие с экспериментальной траекторией поворота судна достигается для пятого типа модели, хотя четвертый тип по своим характеристикам отличается от пятого всего

на $1 \div 2$ м. Отметим, что именно модели четвертого и пятого типов учитывают длительность перекладки пера руля.

Модели первых трех типов имеют гораздо хуже точностные характеристики, которые имеют с.к.о. и траекторную погрешность в $2 \div 4$ раза больше, чем в модели пятого типа, т. е. на $27 \div 125$ м больше.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

Таким образом, получено выражение для расчета величины траекторной погрешности. Показано, что траекторная погрешность зависит от степени адекватности математической модели описываемому реальному процессу поворота судна. Экспериментально подтверждено, что четвертая и пятая модели, учитывающие инерционность судна и время перекладки пера руля, описывают реальную траекторию поворота с точностью, соизмеримую с габаритами судна.

В дальнейшем целесообразно произвести разработку модели поворотливости судна, с учетом потери скорости при повороте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагущенко Л.Л. Судно как объект автоматического управления / Л.Л. Вагущенко - Одесса: ОГМА, 2000. – 140 с.
2. Бурмака И.А. Учет динамики судна при выборе маневра расхождения / И.А. Бурмака // Судовождение. – 2002. - №4. – С. 32- 36.
3. Чапчай Е.П. Учет времени перекладки пера руля при повороте судна / Е.П. Чапчай // Судовождение. – 2005. - № 9. – С. 110–113.