

УДК 656.61.052.484

**PROBABILITY ESTIMATION EQUIVALENCE OF VESSEL
ACCIDENT-FREE SAILING IN CONSTRAINED WATERS**

**ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ
БЕЗАВАРИЙНОГО ПЛАВАНИЯ СУДНА В СТЕСНЕННОМ
РАЙОНЕ**

**I.I. Vorohobin, PhD, associate professor, V.V. Severin, PhD student, Y.V.
Kazak, PhD student**

**И.И. Ворохобин, ктн, доцент, В.В. Северин, аспирант, Ю.В. Казак,
аспирант**

*Odessa National Maritime Academy, Ukraine
Одесская Национальная Морская Академия, Украина*

ABSTRACT

The equivalent methods of probability estimation for a vessel accident-free sailing in constrained waters are obtained, taking into account a law of vector error probability distribution, choice of pre-planned trajectory in the possible region of sailing and its form.

It is shown that probability estimation for vessel accident-free sailing by cross track error applying equivalent method is preferable.

Keywords: safety of navigation, estimation of probability of the accident-free sailing.

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

Несмотря на оснащение морских судов современными навигационными устройствами, наиболее частыми видами аварий в стесненных районах плавания являются посадки на мель и касания грунта. В таких районах морские суда проводят 20 % ходового времени, а на долю аварий в данных районах приходится около 80% от всех происшествий. Для снижения уровня аварийности необходимо повысить точность: планирования пути; определения места; оценки вероятности безаварийного плавания по выбранному маршруту плавания.

Если в судоводительской науке принимаются меры по повышению точности плавания и определения места, то способы оценки вероятности безаварийного плавания разработаны недостаточно. Поэтому исследование способов оценки надежности плавания в стесненных районах является актуальным.

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

Вопросы по оценке надежности судовождения в случае, когда судно следовало мимо выделяющихся (точечных) навигационных опасностей рассматривались в работе [1], а работа [2] посвящена обоснованию критерия навигационной безопасности. Настоящая публикация посвящена вопросу формализации навигационной безопасности судовождения, характеризующейся вероятностью безаварийного плавания судна.

Формулировка целей статьи (постановка задачи) Целью статьи является разработка новых способов оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненных районах и оценки факторов, которые влияют на процесс движения.

Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Выбор безопасного маршрута плавания судна в стесненном районе возможен с использованием высокоточных методов планирования траектории движения моделей и оценки вероятности безаварийного плавания судна P_b по выбранному маршруту. Он задается характеристиками плавания S_n и двумерной плотностью распределения вероятностей позиционной траекторной погрешности $f_t(x, y)$. В качестве такой меры будем использовать априорную вероятность безаварийной проводки судна в заданном районе по выбранному маршруту. При этом судно будем рассматривать в виде точки, расположенной в центре тяжести G .

Безопасную область D плавания судна можно задать в произвольной системе координат. В рассматриваемой задаче безопасную область D будем задавать в системе координат $O \Delta \varphi_t \Delta w_t$, связанной с программной траекторией, для каждого момента времени t , при этом аналитическое выражение безопасной области будем обозначать для каждого момента времени через $D_{t_0}, D_{t_0+1}, \dots, D_t$. Допустим область безопасного плавания D не является выпуклой и задана относительно последовательности систем координат $O \Delta \varphi_t \Delta w_t$, начало которых принадлежит программной траектории и совпадает с прогнозирующими точками места судна для моментов времени $t_0, t_0 + 1, \dots, t$.

Погрешность траекторного управления судном в любой момент времени t характеризует истинное положение судна в системе координат $O \Delta \varphi_t \Delta w_t$, причем последовательность указанных погрешностей во времени является семейством независимых случайных векторов с известными плотностями распределения и ковариационными матрицами $R(t)$.

Вероятность безопасного плавания является вероятностью того, что траектория движения судна принадлежит области D , т. е. вероятность того, что каждая точка траектории движения судна принадлежит безопасной области D . Так как движение судна для рассматриваемой задачи можно описывать линейной моделью, то траектория его движения является совокупностью k

последовательных линейных участков, каждый из которых - перемещение судна за интервал времени Δt между последовательными моментами коррекции параметров его движения.

Вероятность реализации конкретного участка траектории определяется произведением вероятностей реализации его конечных точек, заданных в смежных системах координат $O \Delta \varphi_t \Delta w_t$ и $O \Delta \varphi_{t+1} \Delta w_{t+1}$, причем вероятности равны значениям плотностей распределения $f(\Delta \varphi_t, \Delta w_t, \lambda_t)$ и $f(\Delta \varphi_{t+1}, \Delta w_{t+1}, \lambda_{t+1})$ в указанных конечных точках.

Вероятность того, что начальный участок траектории r_0 принадлежит области безопасного плавания D при условии, что ее начало находится в точке с координатами $\Delta \varphi_{t_0}, \Delta w_{t_0}$ (в системе координат $O \Delta \varphi_{t_0} \Delta w_{t_0}$) равна произведению вероятностей того, что каждый участок r_0 принадлежит D , причем каждая из которых определяется произведением:

$$f(\Delta \varphi_{t_0}, \Delta w_{t_0}, \lambda_{t_0}) f(\Delta \varphi_{t_0+1}, \Delta w_{t_0+1}, \lambda_{t_0+1}).$$

Поэтому можно записать:

$$P\{r_0 \in D / c_0 = \Delta \varphi_{t_0}, \Delta w_{t_0}\} \Rightarrow \\ f(\Delta \varphi_{t_0}, \Delta w_{t_0}, \lambda_{t_0}) \int_{D_{t_0}} f(\Delta \varphi_{t_0+1}, \Delta w_{t_0+1}, \lambda_{t_0+1}) d\Delta \varphi_{t_0+1} d\Delta w_{t_0+1},$$

где c_0 - координаты начала траектории, и вероятность реализации начала первого участка не зависит от переменных $\Delta \varphi_{t_0+1}$ и Δw_{t_0+1} .

Вероятность того, что вся траектория движения судна принадлежит области D , является вероятностью того, что все участки траектории движения судна одновременно принадлежат области D :

$$P\{x(t) \in D\} = \int_{D_{t_n}} f\{\Delta \varphi_{t_0}, \Delta w_{t_0}, G[R(t_0)]\} \int_{D_{t_0}} f\{\Delta \varphi_{t_0+1}, \Delta w_{t_0+1}, G[R(t_0+1)]\} \\ \rightarrow \\ \int_{D_{t_0+1}} f\{\Delta \varphi_{t_0+2}, \Delta w_{t_0+2}, G[R(t_0+2)]\} \dots \int_{D_{t-1}} f\{\Delta \varphi_t, \Delta w_t, G[R(t)]\} \rightarrow \\ d\Delta \varphi_t d\Delta w_t \dots d\Delta \varphi_{t_0+2} d\Delta w_{t_0+2} d\Delta \varphi_{t_0+1} d\Delta w_{t_0+1} d\Delta \varphi_{t_0} d\Delta w_{t_0},$$

где D_{t_n} - часть области D , содержащая множество точек начала траектории;

$R(t)$ - ковариационная матрица погрешности траекторного управления судном.

Производя последовательное интегрирование, получим в итоге следующее выражение:

$$P\{x(t) \in D\} = \Phi_k \{ D_{t_n}, D_{t_0}, \dots, D_{t-2}, D_{t-1}, R(t_0), \dots, R(t-1), R(t) \}. \quad (1)$$

Полученная вероятность $P\{x(t) \in D\}$ является искомой вероятностью безопасного плавания P_{bn} . Поэтому:

$$P_{bn} = \Phi_k \{ D_{t_n}, D_{t_0}, \dots, D_{t-2}, D_{t-1}, R(t_0), \dots, R(t-1), R(t) \}, \quad (2)$$

где Φ_k - функция, характеризующая k -кратное последовательное интегрирование плотности распределения погрешности траекторного управления.

Таким образом, вероятность безопасного плавания P_{bn} зависит от ковариационных матриц $R(t_0), \dots, R(t-1), R(t)$ погрешности траекторного управления судном, области безопасного плавания D и положения в ней программной траектории, типа распределения погрешности траекторного управления, а также числом участков траектории, которое определяется периодом времени Δt .

Рассмотрим случай выпуклой области безопасного плавания D . Свойство, отличающее выпуклую область, заключается в том, что все отрезки прямой принадлежат области D , если концы отрезка находятся в пределах этой области. Указанное обстоятельство позволяет сделать вывод, что множество концов каждого отрезка траектории не зависит от координат его начала.

В случае выпуклой области выражение для P_{bn} принимает следующий вид:

$$P_{bn} = \int_{D_{t_0}} f[x(t_0)] dx(t_0) \int_{D_{t_0+1}} f[x(t_0+1)] dx(t_0+1) \dots \int_{D_t} f[x(t)] dx(t) \Rightarrow \prod_{i=0}^k \int_{D_{t_0+i}} f[x(t_0+i)] dx(t_0+i). \quad (3)$$

Логарифмируя уравнение (3), получим:

$$\ln(P_{bn}) = \sum_{i=0}^k \ln \int_{D_{t_0+i}} f[x(t_0+i)] dx(t_0+i), \quad \text{или}$$

$$P_{bn} = \exp \left\{ \sum_{i=0}^k \ln \int_{D_{t_0+i}} f[x(t_0+i)] dx(t_0+i) \right\}, \quad (4)$$

где k - целая часть отношения $s/(V_m \Delta t)$;

s - длина программной траектории;

V_m - средняя скорость движения судна по программной траектории.

Предлагаемый способ оценки вероятности безаварийного плавания судна P_b требует решения задачи на плоскости с использованием двумерной плотности распределения вероятностей векториальной погрешности и

многократным ее интегрированием в пределах безопасной области D , граница которой имеет сложную форму. Поэтому практическая реализация данного способа оценки вероятности P_b является сложной и трудоемкой.

Поэтому предложим эквивалентный способ расчета априорной вероятности P_b , формулируя задачу в рамках одномерного пространства с использованием одномерной плотности погрешности бокового отклонения судна. Полагаем, что допустимая область безопасного плавания D задана аналитическим описанием ее правой $G_{st}(X, Y)$ и левой $G_{pt}(X, Y)$ границ. В допустимой безопасной области D также задана программная траектория движения судна $Tr_{pr}(X, Y)$, причем каждая точка программной траектории характеризуется парой нормальных расстояний от программной траектории движения до правой и левой границ безопасной области. Эти расстояния обозначены соответственно $L_{st}(X, Y)$ и $L_{pt}(X, Y)$, учитывая, что $(X, Y) \in Tr_{pr}(X, Y)$.

Движение судна по программной траектории сопровождается его неизбежными боковыми отклонениями, которые при воздействии возмущаемых факторов, носят случайных характер. Возникновение случайных боковых отклонений обусловлено стохастической природой погрешностей обсервации и счисления судна и его рысканиями под действием факторов, учет которых принципиально невозможен.

Для того, чтобы судно безопасно прошло заданным стесненным районом необходимо, чтобы его траектория движения принадлежала допустимой безопасной области плавания D , - это означает, что все боковые отклонения судна от программной траектории движения $Tr_{pr}(X, Y)$ на всем ее протяжении не должны превосходить нормальных расстояний $L_{st}(X, Y)$ и $L_{pt}(X, Y)$ до границ допустимой области. Условимся в дальнейшем нормальные расстояния $L_{st}(X, Y)$ до правой границы безопасной области плавания D считать положительными, а до левой границы $L_{pt}(X, Y)$ – отрицательными.

Вероятность ρ_i того, что отдельно взятое i – е боковое отклонение Δ_{bi} не превосходит нормальные расстояния $L_{sti}(X, Y)$ и $L_{pti}(X, Y)$ до правой и левой границ допустимой области плавания определяется следующим аналитическим выражением:

$$\rho_i = P\{L_{pti} \leq \Delta_{bi} \leq L_{sti}\} = \int_{-L_{pti}}^{L_{sti}} f(x) dx,$$

где $f(x)$ – плотность распределения бокового отклонения судна от программной траектории движения.

Если учесть, что правую часть полученного равенства можно выразить через функцию распределения $F(x)$ бокового отклонения, т. е.:

$$\int_{-L_{pti}}^{L_{sti}} f(x) dx = F(L_{sti}) - F(-L_{pti}),$$

то вероятность ρ_i описывается следующей формулой:

$$\rho_i = P\{L_{pti} \leq \Delta_{bi} \leq L_{sti}\} = F(L_{sti}) - F(-L_{pti}).$$

Для безаварийной проводки судна по программной траектории необходимо, как уже отмечалось, чтобы все точки истинной траектории движения судна принадлежали безопасной области плавания D . Если рассматривать большое число предполагаемых проводок судов, то вероятности ρ_i соседних точек программной траектории можно рассматривать как вероятности независимых событий, а общую вероятность P безопасной проводки судна по безопасной области D получим как произведение вероятностей ρ_i по всем точкам программной траектории:

$$P = \prod_i \rho_i, \quad \text{или} \quad P = \prod_i [F(L_{sti}) - F(-L_{pti})].$$

Поскольку $F(L_{sti}) - F(-L_{pti}) = F(L_{sti}) + F(L_{pti})$, поэтому можно записать:

$$P = \prod_i [F(L_{sti}) + F(L_{pti})].$$

Запишем выражение для вероятности P в экспоненциальном виде, с учетом соотношения $P = \exp\{\ln P\}$, будет иметь вид:

$$P = \exp(\ln\{\prod_i [F(L_{sti}) + F(L_{pti})]\}).$$

Очевидно, что имеет место соотношение:

$$\ln\{\prod_i [F(L_{sti}) + F(L_{pti})]\} = \sum_{i=1}^s \ln\{[F(L_{sti}) + F(L_{pti})]\},$$

с учетом которого получим следующее выражение для вероятности P :

$$P = \exp\left\{\sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})]\right\}, \quad (5)$$

где s – длина программной траектории в допустимой области безопасного плавания.

Поскольку ширина допустимой области в стесненных районах плавания намного меньше, чем длина программной траектории s , имеет смысл преобразовать выражение для вероятности P , исходя из возможных значений ширины b допустимой безопасной области плавания D и частот их повторений на протяжении всей длины программной траектории.

Для этого воспользуемся выражением (3), в котором сумму логарифмов $\sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})]$ можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^s \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})] = \sum_{i=1}^{\Delta b} m_i \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})], \quad (6)$$

где $\Delta b = b_{\max} - b_{\min}$ - разность между максимальной b_{\max} и минимальной

b_{\min} шириной допустимой безопасной области;

m_i - количество пар нормальных расстояний L_{sti} и L_{pti} , в сумме составляющих ширину b_i .

Умножим и разделим правую часть выражения (4) на общее число s составляющих суммы, получим выражение для вероятности P :

$$P = \exp \left\{ s \sum_{i=1}^{\Delta b} \frac{m_i}{s} \ln [F(L_{sti}) + F(L_{pti})] \right\}.$$

Отношение m_i/s является частотой повторения значения ширины допустимой области равной b_i . Так как значение ширины b допустимой области изменяется от минимального значения b_{\min} до максимального b_{\max} , то распределение частот m_i/s по значениям ширины b области D является характеристикой допустимой области D , позволяющей формализовать ее степень стесненности. Указанную характеристику целесообразно назвать распределением частот по значениям ширины допустимой области и формально представлять в виде плотности распределения (аналогично плотности распределения вероятностей), которую обозначим $\phi(b)$. При этом выражение для вероятности P принимает следующий вид:

$$P = \exp \left\{ s \sum_{i=1}^{\Delta b} \phi(b_i) \ln [F(L_{sti}) + F(b_i - L_{sti})] \right\}. \quad (7)$$

Полученное выражение позволяет сделать априорную оценку вероятности в зависимости от основных существенных факторов: характеристики стесненности $\phi(b)$ допустимой области плавания D ; характеристик точности, обеспечиваемой системой навигационного оборудования, выражающихся в параметрах функции распределения $F(b)$; выбора программной траектории $Tr_{pr}(X, Y)$ в допустимой области плавания, что влияет на соотношение нормальных расстояний L_{st} и $b - L_{st}$ и длины программной траектории s .

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В статье рассмотрены два способа оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе, учитывающие закон распределения вероятностей векториальной погрешности, выбор программной траектории в допустимой области плавания и ее форму.

Показано, что оценка вероятности безаварийного плавания судна способом бокового отклонения является предпочтительной.

В дальнейшем целесообразно произвести анализ сходимости результатов оценки вероятности безопасного плавания, полученные обоими способами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондрашихин В.Т. Определение места судна / В.Т. Кондрашихин. - М.: Транспорт, 1989. - 230с.
2. Мельник Е.Ф. Обоснование выбора критерия навигационной безопасности судовождения / Е.Ф. Мельник // Судовождение. – 2002. - №5. – С. 65-73.