

Оценка вероятности безопасной проводки судна стесненным маршрутом

В. В. Северин

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-NT2017-148V16-25>

Аннотация. Рассмотрен метод количественной оценки безопасности судовождения при плавании судна в стесненных водах, в которых показателем безопасности судовождения выбрана вероятность безопасной проводки судна заданным маршрутом. Метод учитывает точность контроля места судна при проводке, которая характеризуется случайной погрешностью бокового отклонения от программной траектории движения. Приведены примеры оценки вероятности безопасной проводки судна рассмотренным методом с помощью компьютерной программы.

Ключевые слова: безопасность судовождения, вероятность безопасной проводки, модель оценки безопасности судовождения.

Введение. Одной из наиболее актуальных проблем безопасности мореплавания является обеспечение безаварийного плавания судов в стесненных районах. Решение этой проблемы способствует снижению числа аварий, возникающих по причине посадок судов на мель и навалов на причал. Существенным аспектом решения указанной проблемы является разработка и анализ математической модели формирования вероятности безаварийного плавания судна по выбранному маршруту, который позволяет выявить существенные факторы и предупредить их отрицательное влияние на безопасность процесса судовождения.

Краткий обзор публикаций по теме. В работе [1] впервые рассматривалось влияние позиционной погрешности судна на навигационную безопасность, причем учитывалась только позиционная векториальная погрешность определения места судна и наличие точечной навигационной опасности. Развитие этой тематики отражено в работах [2, 3], причем критерий навигационной безопасности предложен в работе [2], а в работе [3] показаны два эквивалентных подхода к определению вероятности безаварийного плавания судна по заданному стесненному маршруту.

Разработка информационной системы имитационного моделирования движения судов со сложными динамическими моделями рассмотрена в работе [4]. По мнению авторов, данная система позволит обеспечить новый тип планирования маневров судна, а также осуществлять контроль выполнения заданного маневра. Предусмотрено текущее отображение заданного маневра одновременно с фактическим движением судна и с индикацией прогнозируемой траектории.

Работа [5] посвящена вопросам идентификации судовых моделей маневрирования. В данной работе сформирована нелинейная модель маневрирования судна, которая основана на анализе его гидродинамики. Для оценки параметров модели используется теория идентификации систем, причем расчет параметров модели производится по алгоритму, который основан на расширенной теории фильтра Калмана. Получение входных и выходных данных системы, необходимых для идентификации параметров, производилось с использованием циркуляционной и зигзагообразного маневра.

В работе [6] производится обоснование необходимости применения усовершенствованных компьютерных систем, так как средства прогноза движения судов, успешно применявшиеся в течение длительного времени, отличаются упрощенными моделями прогноза движения судна. Указанное обстоятельство ограничивает их

использование в части текущего отображения движения судна при изменении положения руля и оборотов двигателя, а также требует разработки более усовершенствованных прогнозных моделей движения судна.

Интеллектуальная система прогнозирования движения судна, которая рассмотрена в работе [7], имитирует процесс обучения автономного блока управления, созданного с помощью искусственной нейронной сети. Входные сигналы наблюдаются блоком управления, который 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.

Цель. Цель настоящей статьи – описание и анализ метода оценки вероятности безопасной проводки судна в стесненном районе плавания.

Материалы и методы. В работе [7] предложен способ расчета априорной вероятности P_b безаварийной проводки судна стесненным маршрутом с использованием одномерной плотности распределения погрешности бокового отклонения судна. Кратко изложим суть способа. 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 $T_{pr}(X, Y)$, 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 Δ_r . 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 $T_{pr}(X, Y)$ 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. Очевидно, вероятность ρ_i того, что отдельно взятое i -е боковое отклонение Δb_i 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:

$$\rho_i = P\{L_{pti} \leq \Delta b_i \leq L_{sti}\} = \int_{-L_{pti}}^{L_{sti}} f(x) dx, \text{ или}$$

$$\rho_i = P\{L_{pti} \leq \Delta b_i \leq L_{sti}\} = F(L_{sti}) - F(-L_{pti}),$$

где $f(x)$ – плотность распределения бокового отклонения судна от программной траектории движения. 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, а вероятность P в экспоненциальном виде выражается следующим образом:

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

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

где s – длина программной траектории.

В интегральном виде полученное выражение имеет вид:

$$P = \exp\left\{\int_0^s \ln[F(L_{st}) + F(L_{pt})] ds\right\}.$$

Учитывая, что 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 (1), в котором выражение $\sum_{i=1}^s \ln[F(L_{sti}) + F(L_{pti})]$ можно представить в следующем виде:

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

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} .

Умножим и разделим правую часть последнего выражения на общее число s составляющих суммы и 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:

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

Переходя к интегральной характеристике, последнее выражение преобразуется следующим образом:

$$P = \exp\left\{s \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \phi(b) \ln[F(L_{st}) + F(L_{pt})] db\right\}. \quad (2)$$

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 $T_{pr}(X,Y)$ в допустимой области плавания, что влияет на соотношение нормальных расстояний L_{st} и $b - L_{st}$ и длины программной траектории s .

Результаты и их обсуждение. Так как расчет вероятности P_1 безопасной проводки судна по заданному маршруту с помощью выражения (2) является непростой задачей, то для расчета P_1 была разработана имитационная компьютерная программа. С ее помощью вначале формировался стесненный маршрут плавания судна, для чего вводились массивы границ области безопасного плавания и программная траектория движения судна. Для выбранного маршрута выбиралось значение с.к.о. и принималось, что погрешности подчиняются нормальному закону распределения. С помощью компьютерной программы были определены одномерные характеристики выбранного стесненного маршрута, к которым относятся его стесненность и смещенность программной траектории, позволяющие произвести оценку вероятности безопасного плавания P_1 по одномерной модели.

Оценка вероятности безопасной проводки судна производилась по пяти маршрутам. В качестве примера приведем подробный анализ трех маршрутов. Вначале формировался маршрут 1, для которого выбиралось значение с.к.о. равное 5. С помощью компьютерной программы были определены одномерные характеристики маршрута 1, которые позволили произвести точную оценку вероятности безопасного плавания P_1 по одномерной модели, причем, как следует из рис. 1, $P_1 = 0,4871$.

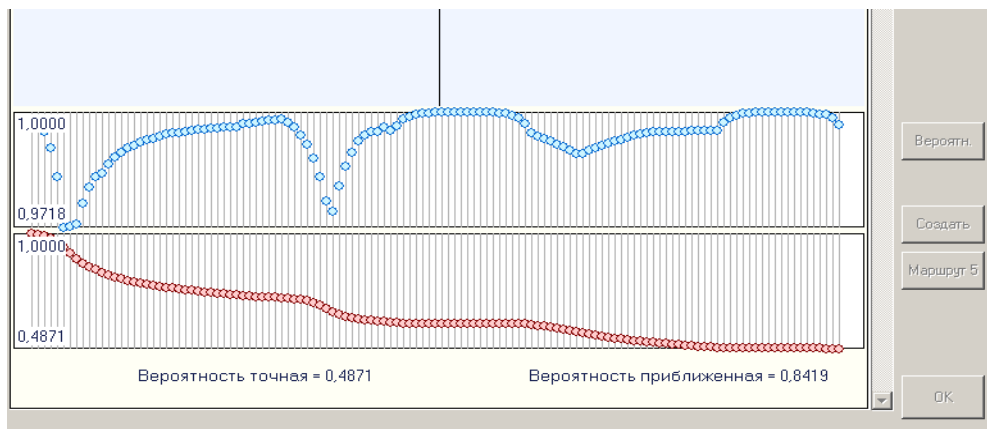


Рис. 1. Оценка вероятности P_1 проводки судна маршрутом 1

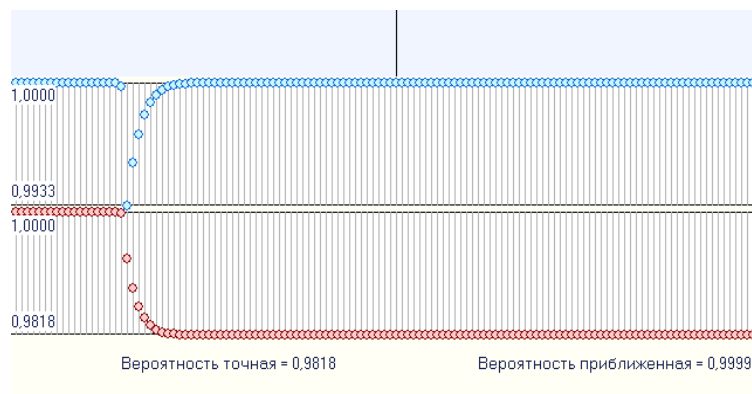


Рис. 2. Оценка вероятности P_1 безопасной проводки судна маршрутом 3

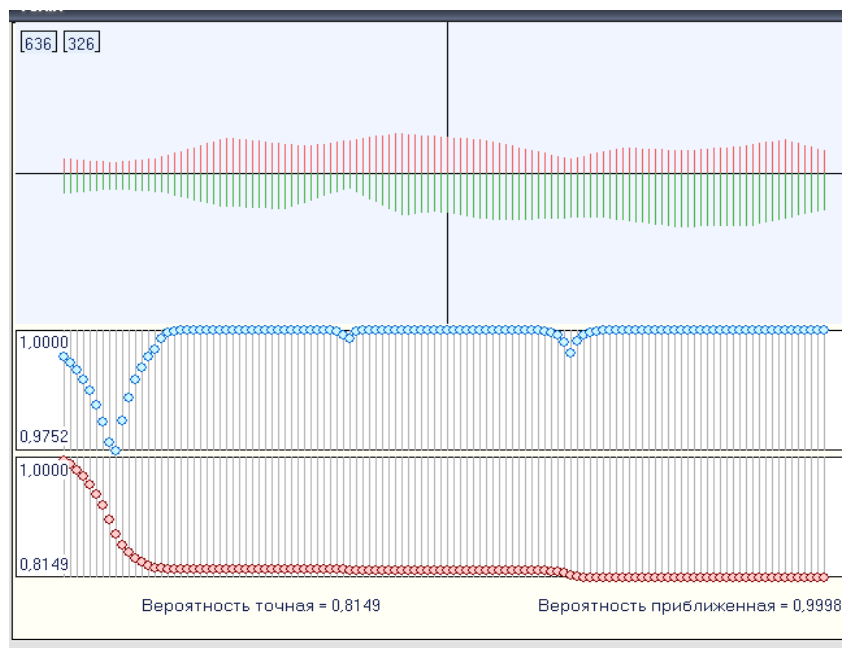


Рис. 3. Вероятность P_1 безопасного плавания судна маршрутом 5

Особенностью очередного маршрута 3 является меньшая степень стесненности относительно прежнего маршрута. Для расчета вероятностей безопасной проводки судна по данному маршруту принималась точность $\sigma=4,3$. Оценка безопасности плавания маршрутом 3 с помощью модели одномерной плотности распределения погрешности бокового отклонения, как показано на рис. 2, составила $P_1 = 0,9818$.

В заключение рассмотрим проводку судна маршрутом 5. При плавании судна этим маршрутом выбрана выше точность контроля места судна, с.к.о. которой $\sigma=4,6$. С помощью модели одномерной плотности распределения погрешности бокового отклонения была определена вероятность P_1 , величина которой составила 0,8149 (рис. 3).

В верхней части последнего рисунка показана допустимая область безопасного плавания судна, в которой осуществляется его проводка.

Таблица 1. Результаты оценки вероятности безопасной проводки судна

Маршрут	1	2	3	4	5
P_1	0,487	0,543	0,9818	0,9179	0,8149
P_2	0,484	0,546	0,982	0,916	0,817
δP (%)	0,6	0,5	0,02	0,2	0,3

Для проверки полученных результатов компьютерной программой рассчитывались значения вероятности P_2 безопасной проводки судна по тем же маршрутам с помощью модели, использующей двумерную плотность распределения позиционной векториальной погрешности, а затем полученные результаты сравнивались. Оценки вероятности безопасной проводки судна по всем пяти маршрутам с помощью обеих моделей приведены в табл. 1.

Выводы

1. Рассмотрен способ оценки вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе с помощью модели с одномерной плотностью распределения бокового отклонения судна от программной траектории движения, который позволяет сделать априорную оценку вероятности в зависимости от характеристики стесненности допустимой области плавания, показателей точности, выбора программной траектории в допустимой области плавания, что влияет на ее смещенность, и длины программной траектории.

2. С помощью разработанной компьютерной программы рассчитаны значения вероятности безаварийного плавания судна в стесненном районе моделью с одномерной плотностью распределения бокового отклонения для пяти стесненных маршрутов, причем результаты расчетов по трем маршрутам приведены в статье.

3. Компьютерной программой также рассчитывались значения вероятности безопасной проводки судна по тем же пяти маршрутам с помощью модели, использующей двумерную плотность распределения позиционной векториальной погрешности.

4. Средняя относительная разница δP между оценками вероятности проводки судна по обоим моделям составляет 0,3 %, что подтверждает правомерность оценки вероятности проводки судна по стесненному маршруту моделью с применением одномерной плотности распределения погрешности бокового отклонения.

ЛИТЕРАТУРА

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/ Мельник Е.Ф.// 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. 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. 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.
6. 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.
7. 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.

REFERENCES

1. Kondrashikhin V.T. Location of ship / Kondrashikhin V.T. - M.: Transport, 1989. – 230s.
2. Melnik E.F. Ground of choice of criterion of navigation safety of navigator/ Melnik E.F.// Sudovozhdenye. – 2002. - № 5. – P. 65 - 73.
3. 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.

Оценка вероятности безопасной проводки судна стесненным маршрутом

В. В. Северин

Аннотация. Рассмотрен метод количественной оценки безопасности судовождения при плавании судна в стесненных водах, в которых показателем безопасности судовождения выбрана вероятность безопасной проводки судна заданным маршрутом. Метод учитывает точность контроля места судна при проводке, которая характеризуется случайной погрешностью бокового отклонения от программной траектории движения. Приведены примеры оценки вероятности безопасной проводки судна рассмотренным методом с помощью компьютерной программы.

Ключевые слова: безопасность судовождения, вероятность безопасной проводки, модель оценки безопасности судовождения.

Estimation of the probability of safe harnessing of a ship by a constrained route

V. V. Severin

Abstract. The method of quantitative assessment of the safety of navigation while navigating a vessel in cramped waters is considered, in which the probability of safe navigation of a vessel by a specified route is chosen as a safety index of navigation. The method takes into account the accuracy of control of the ship's position during wiring, which is characterized by a random error of lateral deviation from the program path of motion. Examples of an estimation of probability of safe wiring of a vessel by the considered method by means of the computer program are given.

Keywords: safety of navigation, probability of safe wiring, model of safety assessment of navigation.