

УДК 519.68:15:681.5

## МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ НАВИГАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ПРИ ДВИЖЕНИИ СУДНА В ОГРАНИЧЕННЫХ ВОДАХ

<sup>1</sup>Гриняк В.М., <sup>2</sup>Гриняк Т.М., <sup>3</sup>Герасименко Л.В.

<sup>1</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, e-mail: griniak.vm@dvfu.ru;

<sup>2</sup>ООО «Тера-Рекон», Токио, e-mail: tgrinyak@gmail.com;

<sup>3</sup>Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, e-mail: LVGer@yandex.ru

Безопасность движения на море представляет собой важнейшую научно-техническую и инженерную проблему. Разработка технологий, моделей и алгоритмов обеспечения безопасности движения морских судов выделилась в отдельную отрасль науки об управлении. Статья посвящена проблеме навигационной безопасности движения морских судов в ограниченных водах. Имея в виду задачу «судно – берег», рассматривается подход, позволяющий вырабатывать тревожные сигналы с выделением различных уровней опасности типа «красный», «жёлтый», «зелёный». В основу критерия разделения уровней опасности положены траекторные свойства движения судов: прямолинейное и равномерное, или маневренное. Предложена система правил, апеллирующая к модельным представлениям типа «судно – берег» и позволяющая упорядочить действия диспетчера при управлении коллективным движением судов. Приводятся результаты моделирования задачи в типичных ситуациях, подтверждающие конструктивность предлагаемых идей.

**Ключевые слова:** управление движением судов, оценка риска столкновения, траектория движения, маневрирование судна, вероятность

## MULTI-LEVEL MODEL FOR SHIPS COLLISION RISK ASSESSMENT IN RESTRICTED WATERS

<sup>1</sup>Grinyak V.M., <sup>2</sup>Grinyak T.M., <sup>3</sup>Gerasimenko L.V.

<sup>1</sup>Far Eastern Federal University, Vladivostok, e-mail: griniak.vm@dvfu.ru;

<sup>2</sup>JSC TeraRecon inc., Tokyo, e-mail: tgrinyak@gmail.com;

<sup>3</sup>Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, e-mail: LVGer@yandex.ru

Maritime safety represents a major scientific and technical and engineering problems. Development of technologies, models and algorithms to ensure vessel traffic safety was allocated in a separate branch of the science of management. The problem of marine vessel traffic control in restricted waters is discussed in this paper. Information system model for marine safety estimation (ship collision avoidance) is watched. Three models of ships domain with different geometric forms are discussed. Static obstacles (coast etc.) modelled by geometric zones. System defines some alarm levels: “green”, “yellow” and “red”. An alarm criterion is based on maneuver detector. Maneuver detector is based on maneuver probability estimation by least squares method. If the ship is maneuvering its alarm level decreases (“yellow”). Mathematical model of position and velocity estimation for alarm generating are offered. Some results of experiments are shown, such as numerical experiments for typical ships traces.

**Keywords:** vessel traffic control, risk assessment, trace, ship maneuver, probability

Навигационная безопасность коллективного движения судов является актуальной проблемой эксплуатации водных транспортных путей [9]. Её обеспечение возложено на береговые системы управления движением судов (СУДС). Их информационной базой являются радары и транспондеры Автоматической идентификационной системы (АИС) [10].

Определение судов, чьё движение является потенциально опасным (ведёт к столкновению), и выработка тревожных сигналов является центральной функцией, реализующей целевое назначение СУДС. Число объектов, для которых в текущий момент времени может быть выработан тревожный сигнал, увеличивается с ростом интенсивности движения [1]. Это является побудительным мотивом дополнительно

учитывать тип навигационной ситуации и выделять различные уровни опасности (типа «очень опасная», «опасная», «почти безопасная» и т.п.) [8].

Настоящая статья посвящена изучению модели задачи предупреждения об опасном сближении типа «судно – берег». Несмотря на то, что этой теме посвящено достаточно много публикаций [4], она продолжает оставаться актуальной для практики. Наличие случайной компоненты, обусловленной инструментальной погрешностью измерений, предопределяет выбор для распознавания опасных ситуаций моделей вероятностного типа.

### Модельные представления задачи

Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. Будем описывать эволюцию координат

объекта простейшими полиномиальными моделями. Целью решения задачи является определение вектора оценок  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ . В силу вероятностного характера значений оценок вектор  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  имеет смысл только вместе с информацией о характеристиках случайных погрешностей оценивания (величинах  $\Delta x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ ,  $\Delta y(t) = y(t) - \hat{y}(t)$ ).

Разделим наблюдаемую акваторию на две зоны: участок, где движение судов возможно без ограничений (разрешённую зону, множество  $Y$ ), и участок, где движение судов запрещено (запрещённую зону, множество  $N$ ). Определим корабельный домен [12, 13]  $S^\circ$  в виде круга радиуса  $R^\circ$ , очерченного вокруг условной точки – центра судна. Будем трактовать этот домен в статическом смысле – как зону, вторжение в которую интерпретируется как опасность. В таком случае за опасную ситуацию можно принять факт наличия (в данный момент времени) непустого пересечения множеств  $N$  и  $S^\circ$ .

Пусть положение наблюдаемого объекта в данный момент времени  $t$  характеризуется оценкой его координат – вектором  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  и функцией плотности распределения вероятностей оценок  $f(x, y)$ . Опишем возможные способы определения понятия «вероятность опасной ситуации».

1. Рассмотрим разрешённую зону  $Y$ . В её рамках выделим зону  $Y^*$  – множество разрешённых положений центра судна (т.е. приведём  $Y$  к  $Y^*$  с учётом радиуса корабельного домена (рисунок а). Если  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  – оценка положения центра объекта, а  $f(x, y)$  – функция плотностей распределения вероятностей оценок, то вероятность того, что  $(x(t), y(t))^T \in Y^*$  (т.е. корабельный

домен в момент времени  $t$  лежит в безопасной зоне) может быть найдена по формуле

$$P_{Y^*}(t) = \int_{Y^*} f(x, y) dx dy. \quad (1)$$

2. Как и в первом случае, приведём зону  $Y$  к  $Y^*$ . Пусть  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in Y^*$ . Обозначим через  $\rho$  минимальное расстояние от  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  до границы  $Y^*$  и введём понятие круга безопасности объекта  $S_{Y^*}$  – круга с центром  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  и радиусом  $\rho$  (рисунок, б); как видно из рисунка,  $S_{Y^*}$  не следует отождествлять с корабельным доменом  $S^\circ$ . Вероятность того, что  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in S_{Y^*}$  (т.е. центр судна в момент времени  $t$  лежит в круге безопасности) может быть найдена по формуле

$$P_{S_{Y^*}}(t) = \int_{S_{Y^*}} f(x, y) dx dy. \quad (2)$$

В случае, когда  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \notin Y^*$ , примем  $P_{S_{Y^*}}(t) = 0$ .

3. Рассмотрим вектор оценок координат объекта  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  и зону  $Y^*$ . Пусть  $|\rho|$  – минимальное расстояние от точки  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$  до границы  $Y^*$ , причём  $\rho > 0$ , если  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in Y^*$ , и  $\rho < 0$ , если  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \notin Y^*$  (рисунок, в). Если  $f(\rho)$  – функция плотности распределения вероятностей случайной величины  $\rho$  (вероятностный характер которой обусловлен статистикой  $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ ), то вероятность того, что  $\rho > 0$  в момент времени  $t$  (то есть центр объекта лежит в зоне  $Y^*$ ) можно определить по формуле

$$P_{\rho > 0}(t) = \int_0^\infty f(\rho) d\rho. \quad (3)$$

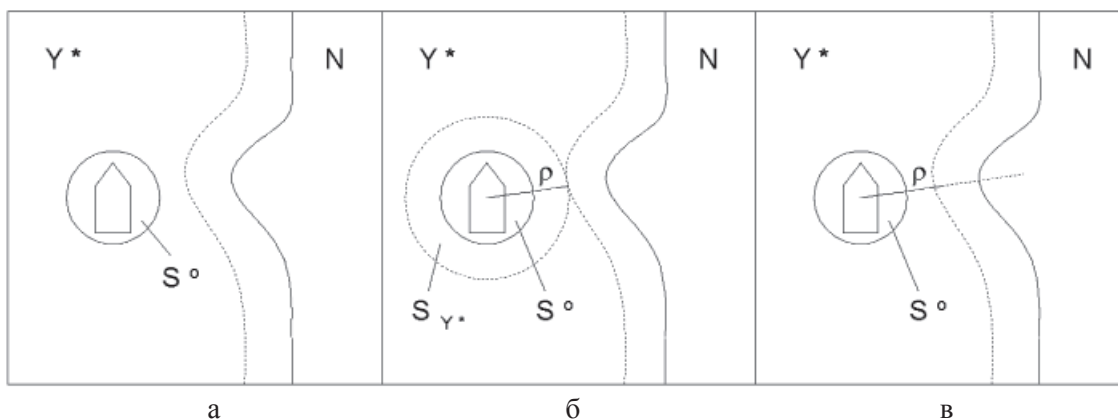


Иллюстрация понятий, используемых при моделировании опасной ситуации для случая «судно – берег»

Величины  $P_{y^*}(t)$ ,  $P_{S_{y^*}}(t)$  и  $P_{p>0}(t)$  можно интерпретировать как вероятности безопасной ситуации в момент времени  $t$  (безопасного положения судна по отношению к берегу). Соответственно, величины  $1 - P_{y^*}(t)$ ,  $1 - P_{S_{y^*}}(t)$  и  $1 - P_{p>0}(t)$  можно принять в качестве вероятностей опасной ситуации.

### Метод решения задачи

Предлагаемый метод оценки вектора состояния задачи связан с её сведением к конечномерному виду задачи метода наименьших квадратов. Применение метода наименьших квадратов даёт возможность достаточно просто определить функцию плотности распределения вероятности координат объекта  $f(x, y)$ . Так, можно показать, что в этом случае  $f(x, y)$  близка к плотности двумерного нормального распределения со средним  $(x(t_0), y(t_0))^T$  и дисперсиями  $\sigma_x^2(t_0)$ ,  $\sigma_y^2(t_0)$ ,  $\sigma_{xy}^2(t_0)$ , соответствующими дисперсионной матрице задачи.

Будем разделять наблюдаемые объекты на два класса: движущиеся прямолинейно и равномерно и маневрирующие. Предлагается следующий алгоритм выделения маневрирующих объектов. Пусть  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$  и  $\sigma_{a_x}^2$ ,  $\sigma_{a_y}^2$  – значения оценок ускорений объекта и их дисперсий, вычисленные методом наименьших квадратов. Тогда вероятность того, что нулевые значения ускорений  $ax$ ,  $ay$  не входят в область их вероятных значений, может быть определена формулами

$$\begin{aligned} P(a_x \neq 0) &= \int_0^{2|\hat{a}_x|} f_{a_x}(\tau) d\tau; \\ P(a_y \neq 0) &= \int_0^{2|\hat{a}_y|} f_{a_y}(\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $f_{a_x}(\tau)$ ,  $f_{a_y}(\tau)$  – функции плотностей нормального распределения со средними  $|\hat{a}_x|$ ,

$|\hat{a}_y|$  и дисперсиями  $\sigma_{a_x}^2$ ,  $\sigma_{a_y}^2$ . Решение о том, что объект является маневрирующим, принимается в том случае, если значение  $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$  превышает некоторый порог. В противном случае принимается решение о неопределённой ситуации.

Определим следующие вербальные уровни опасности для объекта. Под ситуацией с уровнем опасности «красная тревога» (RED) будем понимать ситуацию, когда возникновение опасности возможно без изменения текущих курса и скорости движения. Ситуацией с уровнем опасности «желтая тревога» (YELLOW) назовём ситуацию, когда возникновение опасности имеет место при маневрировании судна. Наконец, уровнем «отсутствие тревоги» (GREEN) будем называть случай, когда возникновение опасности маловероятно при любом типе движения [7, 11, 2].

Введём величины  $P_1^c$ ,  $P_2^c$ , определяемые в зависимости от типа объекта:

$$P_1^c = \min_{T_1} P(t);$$

– для объектов, движущихся прямолинейно и равномерно, и

$$P_2^c = \min_{T_2} P(t);$$

– для маневрирующих объектов. Здесь  $T_1$ ,  $T_2$  – время прогнозирования траектории для модели соответствующего порядка;  $P(t)$  – вероятность безопасной ситуации, определяемая как (1), (2) или (3).

В соответствии с описанными модельными представлениями предлагается следующая дискретная система правил соотнесения уровней опасности с вычисленными значениями вероятностей  $P_1^c$  и  $P_2^c$  (таблица). Здесь  $p_*$  – некоторый порог безопасности, с которым сравниваются значения  $P_1^c$ ,  $P_2^c$ ;  $d$  – значения детектора маневра, причём  $d = 1$ , если манёвр зафиксирован, и  $d = 0$  в случае неопределённой ситуации; «GREEN», «YELLOW», «RED» – соответствующие вербальные значения уровня опасности.

Система правил определения уровня опасности в задаче «судно – берег»

№ п/п	$P_1^c < p_*$	$P_2^c < p_*$	d	GREEN	YELLOW	RED
1	+	+	1		+	
2	+	+	0			+
3	+	–	1	+		
4	+	–	0			+
5	–	+	1		+	
6	–	+	0		+	
7	–	–	1	+		
8	–	–	0	+		

На практике определение в условиях внешнего наблюдения по конкретному судну уровня «GREEN» означает, что его движение не представляет опасности; уровня «YELLOW» означает, что опасная ситуация возможна, но при этом судно маневрирует, то есть судоводитель, скорее всего, сам контролирует ситуацию и старается придать движению безопасный характер; уровня «RED» – движение судна ведёт к опасности и необходимо начать манёвр уклонения [3–6].

### Заключение

Рассмотренный в статье подход к решению задачи предупреждения об опасном сближении судов позволяет наглядно представлять особенности навигационной обстановки. Предложенная цветовая интерпретация уровней тревоги типа «красный» и «желтый» интуитивно понятна судоводителям и операторам СУДС.

Результаты работы ориентированы на расширение функций современных систем управления движением судов.

### Список литературы

1. Бродский П.Г., Румянцев Ю.В., Некрасов С.Н. К вопросу оценки влияния интенсивности судоходства на аварийность // *Навигация и гидрография*. – 2010. – № 30. – С. 36–42.
2. Бурмака А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. – 2014. – № 1. – С. 20–22.
3. Головченко Б.С., Гриняк В.М. Информационная система сбора данных трафика морской акватории // *Научно-техническая информация. Сер. 2: Информационные процессы и системы*. – 2014. – № 8. – С. 24–28.
4. Головченко Б.С., Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Нечёткая система предупреждения об опасном сближении морских судов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2015. – № 1. – С. 15–25.
5. Гриняк В.М. Нечеткая система распознавания опасного сближения морских судов // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2014. – № 6. – С. 6–10.
6. Гриняк В.М. Обзор методов обеспечения безопасности движения морских судов // *Территория новых возможностей // Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. – 2014. – № 3. – С. 27–47.
7. Гриняк В.М., Головченко Б.С., Малько В.Н. Распознавание опасных ситуаций системами управления движением судов // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2011. – № 8. – С. 42–45.
8. Коноплев М.А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения // *Эксплуатация морского транспорта*. – 2009. – № 2. – С. 34–39.
9. Моисеев Г.А. Безопасность морского судоходства // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2010. – № 12. – С. 43–45.

10. Ростопшин Д.Я., Антонова Д.А. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2007. – № 9. – С. 63–69.

11. Сазонов А.Е., Дерябин В.В. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. – 2013. – № 3. – С. 6–13.

12. Шубин А.Б., Александров Е.Г., Харченков Г.Г. Близкое к оптимальному управление траекторией движения объекта // *Проблемы управления*. – 2010. – № 3. – С. 73–78.

13. Tam Ch.K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters // *Journal of Navigation*. – 2009. – Vol. 62. – № 3. – P. 455–476.

### References

1. Brodskiy P.G., Rumyantsev Yu.V., Nekrasov S.N. *Navigatsiya i gidrografiya*, 2010, no. 30, pp. 36–42.
2. Burmaka A.I. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*, 2014, no. 1, pp. 20–22.
3. Golovchenko B.S., Grinyak V.M. *Naucho tehnicheskaya informatsiya*, 2014, no. 8, pp. 24–28.
4. Golovchenko B.S., Grinyak V.M., Devyatitsilnyy A.S. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*, 2015, no. 1, pp. 15–25.
5. Grinyak V.M. *Transport: nauka, tehnika, upravleniye*, 2014, no. 6, pp. 6–10.
6. Grinyak V.M. *Territoriya novih vozmozhnostey. Vestnik VGUES*, 2014, no. 3, pp. 27–47.
7. Grinyak V.M., Golovchenko B.S., Malko V.N. *Transport: nauka, tehnika, upravleniye*, 2011, no. 8, pp. 42–45.
8. Konoplev M.A. *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2009, no. 2, pp. 34–39.
9. Moiseev G.A. *Transport: nauka, tehnika, upravleniye*, 2010, no. 12, pp. 43–45.
10. Rostopshin D.Ya., Antonova D.A. *Mehatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*, 2007, no. 9, pp. 63–69.
11. Sazonov A.E., Deryabin V.V. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova*, 2013, no. 3, pp. 6–13.
12. Shubin A.B., Alexandrov E.G., Harchenkov G.G. *Problemy upravleniya*, 2010, no. 3, pp. 73–78.
13. Tam Ch.K., Bucknall R., Greig A. *Journal of Navigation*, 2009, vol. 62, no. 3, pp. 455–476.

### Рецензенты:

Игнатюк В.А., д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса Минобразования РФ, г. Владивосток;

Кривошеев В.П., д.т.н., профессор кафедры информационных технологий и систем, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса Минобразования РФ, г. Владивосток.