

# СИСТЕМА ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ МОРСКОЙ АКВАТОРИИ НА ОСНОВЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СЕТИ<sup>1</sup>

В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный

Рассмотрена модель информационной системы, оценивающей безопасность коллективного движения морских судов. Система позволяет выделять различные уровни опасности типа «высокий», «средний» и «низкий». В основу разделения уровней опасности положены характер сближения судов, время до сближения и степень маневрирования судов. Предложен подход к фазификации задачи и конфигурация нейро-нечеткой сети, генерирующей предупреждающие сигналы. Представлены результаты вычислительного эксперимента и натурных испытаний.

**Ключевые слова:** управление движением судов, опасное сближение, траектория движения, маневрирование судна, нечеткая нейронная сеть.

## ВВЕДЕНИЕ

Навигационная безопасность движения — важнейший аспект организации перевозок и планирования работы морского транспорта. В настоящее время оперативный контроль за движением судов в акватории морских портов осуществляется специализированными системами управления движением судов (СУДС).

Работа СУДС связана с решением целого ряда специфических задач. Функциональное ядро СУДС составляют навигационные задачи, связанные с определением координат (наблюдением) судов, анализом и планированием их траекторий, интерпретацией, визуализацией информации о движении и выработкой диспетчерских решений [1].

Для движения морского транспорта характерна особая отраслевая специфика. Несмотря на развитие технологий автономных движущихся объектов (например, беспилотных летательных аппаратов, наземных роботов и др.), методы управления их движением не применимы для судоводительской практики. Это связано с тем, что каждая ситуация, сложившаяся при движении судов, по-своему уни-

кальна и зависит от множества факторов — Международных правил предупреждения столкновений судов (МППСС) [2], правил судоходства на конкретной акватории, состояния водной среды (течение, волнение), погодных условий, характера движения других судов, находящихся на акватории и т. д. Кроме того, динамика судна как объекта, движущегося в жидкой среде, также исключительно сложна [3]. Поэтому сложившийся термин СУДС не подразумевает управления судном в классическом понимании (это задача систем автоматической прокладки курса и авторулевых [4, 5]). Задача СУДС состоит в общей координации (диспетчеризации) движения путем выдачи оператором СУДС указаний (например, о снижении скорости или изменении полосы движения), а способ выполнения этих указаний выбирает капитан судна. Таким образом, СУДС представляет собой систему поддержки принятия решений [6].

В работах, опубликованных ранее, авторами рассматривались варианты моделей такой системы поддержки принятия решений; исследовались модели экспертного оценивания состояния безопасности с выделением различных уровней опасности как четкого [7], так и нечеткого типа [8]. Существенный недостаток рассмотренных моделей заключается в потере устойчивости при больших расстояниях между наблюдаемыми судами, что часто не

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-08-00234А).



позволяло заблаговременно генерировать предупреждающие сигналы.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности создания экспертной системы поддержки принятия решений, оценивающей навигационную безопасность коллективного движения морских судов и обеспечивающей заблаговременное распознавание опасных ситуаций с привлечением идей нейронных сетей и нечетких систем. В качестве критерия разделения уровней опасности предлагается степень интенсивности маневрирования судов. Такой подход выгодно отличается хорошей устойчивостью работы системы.

## 1. ОСНОВНЫЕ МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Традиционный подход при моделировании навигационной безопасности коллективного движения заключается в построении модели безопасности «судно — судно» для каждой пары судов (такой подход применяется во многих известных алгоритмах предупреждения столкновений [9, 10]).

Примем, что в качестве информационной базы СУДС служит РЛС или приемопередатчик автоматической идентификационной системы, передающий информацию GPS/ГЛОНАСС; измерение траектории каждого судна включает в себя определение его координат.

Рассмотрим два судна с координатами  $x^{(1)}, y^{(1)}$  и  $x^{(2)}, y^{(2)}$  и скоростями  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$  и  $v_x^{(2)}, v_y^{(2)}$ . Будем описывать их коллективное движение набором величин  $s = (r_x, r_y, v_x, v_y)^T$  — вектором состояния коллективного движения двух судов ( $T$  — символ транспонирования), где  $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$ ,  $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$  — компоненты вектора относительного положения судов  $\mathbf{r}$ ,  $v_x = v_x^{(1)} - v_x^{(2)}$ ,  $v_y = v_y^{(1)} - v_y^{(2)}$  — компоненты вектора относительной скорости движения судов  $\mathbf{v}$  (рис. 1).

Примем модельные представления об эволюции вектора состояния коллективного движения:

$$\begin{aligned} r_x(t_{i+1}) &= r_x(t_i) - v_x(t_i)\tau + q_{rx}(t_i), \\ r_y(t_{i+1}) &= r_y(t_i) - v_y(t_i)\tau + q_{ry}(t_i), \\ v_x(t_{i+1}) &= v_x(t_i) + q_{vx}(t_i), \\ v_y(t_{i+1}) &= v_y(t_i) + q_{vy}(t_i). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\tau = t_{i+1} - t_i$  — разность между соседними моментами времени, в которые приходят измерения,  $q_{rx}(t_i), q_{ry}(t_i), q_{vx}(t_i), q_{vy}(t_i)$  — случайные не моделируемые параметры движения. Принятая модель относительного движения судов (1) — ки-

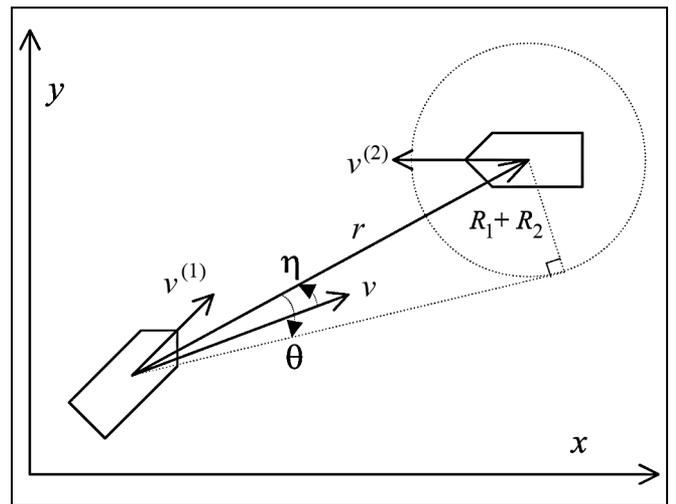


Рис. 1. Модель относительного движения пары «судно — судно»

нематическая; такие модели типичны в задачах наблюдения движущихся объектов при отсутствии информации о силах и моментах, обуславливающих движение.

Уравнения измерений:

$$\begin{aligned} z_x(t_i) &= r_x(t_i) + p_x(t_i), \\ z_y(t_i) &= r_y(t_i) + p_y(t_i), \quad i = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $z_x(t_i), z_y(t_i)$  — измерения соответствующих проекций вектора относительного положения судов  $\mathbf{r}$ , полученные в момент времени  $t_i$ ;  $p_x(t_i)$  и  $p_y(t_i)$  — случайные инструментальные ошибки измерений;  $N$  — число измерений. Решением системы уравнений (1) и (2) является оценка вектора состояния коллективного движения двух судов  $\hat{s} = (\hat{r}_x, \hat{r}_y, \hat{v}_x, \hat{v}_y)^T$  в каждый момент времени  $t_i$ .

Совокупность величин  $r_x, r_y, v_x, v_y$  свидетельствует о потенциально опасном движении двух судов, если [11, 12]:

- направление вектора скорости относительного движения судов  $\mathbf{v}$  близко к направлению вектора относительного положения судов  $\mathbf{r}$ ;
- время, оставшееся до максимального сближения судов, ниже допустимого.

Формализация этих условий определяется конкретной трактовкой понятия «опасная ситуация». В практике судовождения считается, что для обеспечения безопасного плавания наиболее значимо соблюдение некоей «зоны безопасности» вокруг судна, называемой также «корабельным доменом» [13, 14]. В настоящей работе рассматривается корабельный домен, жестко привязанный к судну с номером  $n$  и интерпретируемый окружностью заданного радиуса  $R_n$ .

Введем величины (см. рис. 1):  $|\mathbf{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$  — расстояние между судами;  $|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  — скорость относительного движения судов;  $\theta = \arcsin \frac{R_1 + R_2}{|\mathbf{r}|}$  — угол, определяемый расстоянием между судами и размерами их доменов (считается, что в безопасном состоянии корабельные домены не должны «вторгаться» друг в друга);  $\eta = \arccos \frac{r_x v_x + r_y v_y}{|\mathbf{r}| |\mathbf{v}|}$  — угол между векторами  $\mathbf{r}$  и  $\mathbf{v}$ ;  $\frac{d|\mathbf{r}|}{dt} = -\frac{r_x v_x + r_y v_y}{|\mathbf{r}|}$  — скорость изменения расстояния между судами;  $T = -\frac{|\mathbf{r}|^2}{r_x v_x + r_y v_y}$  — приближенное время, оставшееся до максимального сближения судов (необходимо доопределить функцию для случая относительно неподвижных судов).

Потенциально опасное сближение двух судов может быть формализовано как:

$$\eta < \theta, \quad (3)$$

$$0 < T < T^*, \quad (4)$$

где  $T^*$  — пороговое значение. Условие (3) формализует опасную ситуацию при равномерном и прямолинейном движении судов, условие (4) отбирает из общего массива лишь те суда, время до сближения которых меньше порогового.

Что касается маневрирующих судов, то опыт практического судовождения показывает, что маневрирующие и не маневрирующие суда в смысле коллективной безопасности их движения имеют принципиальные различия. Прежде всего, при внешнем наблюдении достоверный прогноз траектории маневрирующего объекта невозможен. Кроме того, на практике маневрирование судна, как правило, свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией [7, 8]. Поэтому с позиций внешнего наблюдения для маневрирующего объекта вербальный уровень опасности заведомо ниже, чем для не маневрирующего. Эта особенность служит побудительным мотивом оценивать не только набор величин  $r_x, r_y, v_x, v_y$  и условия (3) и (4), но и дополнительно определять характер движения судов (прямолинейное и равномерное или маневренное).

В настоящей работе ставится задача нахождения вектора состояния коллективного движения двух судов  $(r_x, r_y, v_x, v_y)^T$ , определения характера движения судов и формулировки вывода о той или иной степени опасности сложившейся навигационной ситуации.

## 2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Запишем уравнения (1) и (2) в обобщенном виде «состояние — измерение»:

$$\mathbf{s}(t_{i+1}) = \Phi \mathbf{s}(t_i) + \mathbf{q}(t_i),$$

$$\mathbf{z}(t_i) = \mathbf{H} \mathbf{s}(t_i) + \mathbf{p}(t_i), \quad (5)$$

где  $\Phi$  и  $\mathbf{H}$  — матрицы коэффициентов, определяемые уравнениями (1) и (2).

Модель оценки вектора состояния  $\mathbf{s}(t_i)$  по измерениям  $\mathbf{z}(t_i)$  может быть представлена уравнением:

$$\hat{\mathbf{s}}(t_{i+1}) = \Phi \hat{\mathbf{s}}(t_i) + \mathbf{K}(\mathbf{z}(t_{i+1}) - \mathbf{H} \Phi \hat{\mathbf{s}}(t_i)), \quad (6)$$

здесь  $\hat{\mathbf{s}}(t_i)$  — оценка вектора состояния,  $\mathbf{K}$  — матрица коэффициентов.

Известно множество подходов к заданию матрицы  $\mathbf{K}$ . В настоящей работе выбор сделан в пользу популярного в практических приложениях  $\alpha$ - $\beta$ -алгоритма [15]. В этом алгоритме коэффициенты матрицы  $\mathbf{K}$  зависят от порядкового номера момента времени, прошедшего с начала итерационной процедуры (6): они уменьшаются от итерации к итерации. Это приводит к тому, что с ростом числа итераций алгоритм (6) будет успешно оценивать траектории судов, движущихся прямолинейно и равномерно, а для маневрирующих судов погрешность оценки будет довольно высокой. Эта особенность алгоритма позволяет наряду с оценкой параметров движения судов определить характер их движения. Идея такого определителя маневра была предложена авторами в работах [16] и др.

Пусть  $\hat{\mathbf{s}}^{(j)}(t_i)$  — оценка вектора состояния  $\mathbf{s}(t_i)$ , полученная  $\alpha$ - $\beta$ -алгоритмом при обработке  $J$  последних измерений. Если при этом задача одновременно решается при  $J, J-1, J-2, \dots$  и, наконец, только при одном измерении, то в момент времени  $t_i$  будем иметь кортеж векторов оценки

$$\hat{\mathbf{S}}^{(j)}(t_i) = \{\hat{\mathbf{s}}^{(1)}(t_i), \hat{\mathbf{s}}^{(2)}(t_i), \hat{\mathbf{s}}^{(j-1)}(t_i), \dots, \hat{\mathbf{s}}^{(j)}(t_i)\}.$$

Каждому вектору  $\hat{\mathbf{s}}^{(j)}(t_i)$  соответствует вектор невязки  $\delta \mathbf{z}(t_i)^{(j)} = \mathbf{z}(t_i) - \mathbf{H} \hat{\mathbf{s}}^{(j)}(t_i)$ . Таким образом, при сопровождении объекта будем иметь кортеж векторов невязок

$$\begin{aligned} d^{(j)}(t_i) &= \\ &= \{\delta \mathbf{z}(t_i)^{(1)}, \delta \mathbf{z}(t_i)^{(2)}, \dots, \delta \mathbf{z}(t_i)^{(j-1)}, \delta \mathbf{z}(t_i)^{(j)}\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Элементы кортежа (7) служат основным информативным признаком, характеризующим качество оценки с тем или иным значением  $J$ . Для

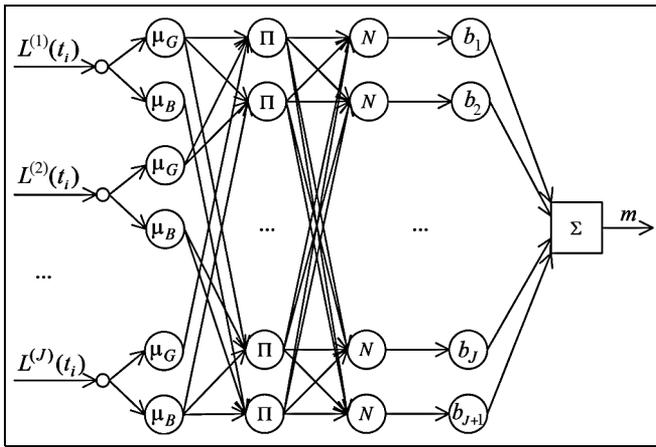


Рис. 2. Схема нейро-нечеткой сети, оценивающей степень интенсивности маневрирования судов

дальнейшего анализа качества оценки целесообразно перейти к кортежу относительных величин

$$\Delta^{(j)}(t_i) = \{L^{(1)}(t_i), L^{(2)}(t_i), \dots, L^{(j-1)}(t_i), L^{(j)}(t_i)\}, \quad (8)$$

где  $L^{(j)}(t_i) = |\delta z(t_i)^{(j)}|/\sigma$ , а  $\sigma$  — величина, характеризующая среднеквадратичное отклонение вектора погрешностей измерений  $\mathbf{p}(t_i)$  в уравнении (5).

Введем лингвистическую переменную  $Q^{(j)}(t_i)$  «качество оценки алгоритмом (6) по  $j$  последним измерениям» с терминами «Good» («хорошее») и «Bad» («плохое»), имеющими функции принадлежности типа «дополнение»:

$$\mu_{Good}(L) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_L(L - c_L))},$$

$$\mu_{Bad}(L) = \frac{1}{1 + \exp(-a_L(L - c_L))},$$

где  $a_L$  и  $c_L$  — настраиваемые параметры. Они выбираются так, чтобы при на левой границе универсального множества (то есть при  $L = 0$ ) имела место пара  $\mu_{Good}(L) \approx 1, \mu_{Bad}(L) \approx 0$ , а на правой границе универсального множества имела место обратная пара  $\mu_{Good}(L) \approx 0, \mu_{Bad}(L) \approx 1$ .

Величины  $L^{(j)}(t_i)$  обрабатываются нейро-нечеткой сетью, показанной на рис. 2, на вход которой подается кортеж величин (8), а на выходе формируется числовое значение  $m \in [1, J]$  — вещественное число, соответствующее максимальному количеству измерений, дающих качественную оценку вектора состояния  $\mathbf{s}(t_i)$  и характеризующее степень интенсивности маневрирования судов (чем меньше  $m$ , тем интенсивнее маневр). Сеть имеет  $J$  входов и состоит из пяти слоев [17].

В узлах первого слоя вычисляются значения функций принадлежности  $\mu_{Good}(L)$  и  $\mu_{Bad}(L)$  для каждого из входов. Узлы  $\Pi$  второго слоя (всего  $J + 1$  узлов) соответствуют посылкам  $J + 1$  нечетких правил (табл. 1). Каждый узел второго слоя соединен с теми узлами первого слоя, которые формируют посылки соответствующего правила. Выходом каждого узла второго слоя служит степень выполнения  $j$ -го правила, которая рассчитывается как произведение входных сигналов. Узлы  $N$  третьего слоя ( $J + 1$  узлов) рассчитывают относительную степень выполнения каждого нечеткого правила.

Узлы  $b_1, b_2, \dots, b_{J+1}$  четвертого слоя формируют заключения нечетких правил (см. табл. 1); это значения выхода сети при однозначном выполнении только соответствующего правила. Единственный узел пятого слоя агрегирует результат, полученный по разным правилам, суммируя вклады всех правил.

Правила и заключения табл. 1 следует читать так. Если, например, значения  $Q^{(1)}(t_i), Q^{(2)}(t_i), Q^{(3)}(t_i)$  с высокой степенью соответствуют терму «Good» (т. е.  $\alpha$ - $\beta$ -алгоритмы (6) с числом измерений 1, 2 и 3 обеспечивают малую невязку измерения), а значения  $Q^{(4)}(t_i), Q^{(5)}(t_i), \dots, Q^{(j)}(t_i)$  с высокой степенью соответствуют терму «Bad» (т. е. алгоритмы с числом измерений 4 и выше порождают большую невязку измерения), то выход сети  $m$  (степень интенсивности маневрирования судна) равен 3. Отметим одну особенность модели рассматриваемого определителя маневра. Если  $Q^{(j)}(t_i)$  соответствует терму «Good», то и  $Q^{(j-1)}(t_i)$  тоже будет соответствовать терму «Good», а если  $Q^{(j)}(t_i)$  соответствует терму «Bad», то и  $Q^{(j+1)}(t_i)$  тоже будет соответствовать терму «Bad». Поэтому табл. 1 имеет «диагональный» вид и содержит всего  $J + 1$  правило.

Для нечеткого описания величин, определяющих характер движения судов, возможность их

Таблица 1

Нечеткие правила и их заключения, моделируемые нейро-нечеткой сетью (см. рис. 2)

№	$Q^{(1)}(t_i)$	$Q^{(2)}(t_i)$	...	$Q^{(j-1)}(t_i)$	$Q^{(j)}(t_i)$	$b_j$
1	Good	Good	...	Good	Good	J
2	Good	Good	...	Good	Bad	$J - 1$
3	Good	Good	...	Bad	Bad	$J - 2$
...	...	...	...	...	...	...
$J - 1$	Good	Bad	...	Bad	Bad	2
$J$	Good	Bad	...	Bad	Bad	1
$J + 1$	Bad	Bad	...	Bad	Bad	1

опасного сближения и время до максимального сближения, введем еще несколько лингвистических переменных.

Пусть  $P_m(t_i)$  определяет характер движения судна в момент времени  $t_i$  и имеет термы «Maneuverable» (маневренное) и «Constant» (равномерное), с функциями принадлежности типа «дополнение»:

$$\lambda_{Maneuverable}(m) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_m(m - c_m))},$$

$$\lambda_{Constant}(m) = \frac{1}{1 + \exp(-a_m(m - c_m))},$$

где  $a_m$  и  $c_m$  — настраиваемые параметры.

Пусть  $P_f(t_i)$  определяет отношение  $f = \eta/\theta$  в момент времени  $t_i$  и имеет термы «Big» («большое», безопасная ситуация) и «Little» («малое», опасная ситуация) с функциями принадлежности типа «дополнение»:

$$\rho_{Little}(f) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_f(f - c_f))},$$

$$\rho_{Big}(f) = \frac{1}{1 + \exp(-a_f(f - c_f))},$$

где  $a_f$  и  $c_f$  — настраиваемые параметры.

Пусть  $P_T(t_i)$  определяет величину  $T$  в момент времени  $t_i$  и имеет термы «Little» («малое»), «Average» («среднее») и «Large» («большое») с функциями принадлежности типа «кластер»:

$$v_{Little}(T) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_1^T(T - c_1^T))},$$

$$v_{Average}(T) = \exp\left(-\frac{(T - c_2^T)^2}{a_2^T}\right),$$

$$v_{Large}(T) = \frac{1}{1 + \exp(-a_3^T(T - c_3^T))},$$

где  $a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T$  — настраиваемые параметры. Описание лингвистической переменной  $P_T(t_i)$  тремя термами соответствует трем принятым на практике состояниям времени  $T$  [18]. Терм «Little» определяет время, когда существует возможность принять только одно решение, которое поможет избежать столкновения. Терм «Average» — время, которое требуется для грамотного проведения оптимального маневра, т. е. время, когда уже можно начинать маневр, но еще есть время «исправить» результат ошибочного маневрирования, есть время на «вторую попытку». Терм «Large» описывает время, когда не нужно предпринимать ка-

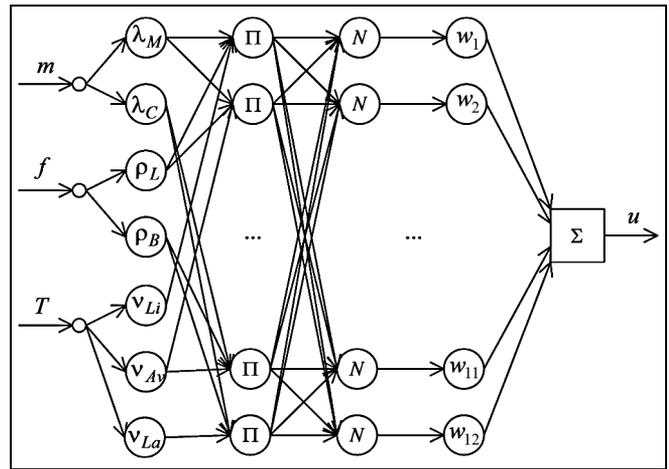


Рис. 3. Схема нейро-нечеткой сети, определяющей уровень опасности навигационной ситуации «судно — судно»

кие-либо действия, так как ситуация может измениться и это потребует, возможно, исполнения совсем другого маневра.

Величины  $m$ ,  $f$  и  $T$  (вход) обрабатываются нейро-нечеткой сетью, показанной на рис. 3, на выходе которой формируется числовое значение  $u \in [0, 2]$  — уровень опасности навигационной ситуации «судно — судно»; значение  $u = 0$  соответствует наименьшему уровню опасности,  $u = 2$  — наибольшему. Сеть состоит из пяти слоев.

В узлах первого слоя вычисляются значения функции принадлежности. Узлы второго слоя (всего 12 узлов) соответствуют посылкам 12 возможных нечетких правил, комбинирующих все возможные значения величин  $P_m(t_i)$ ,  $P_f(t_i)$  и  $P_T(t_i)$  (табл. 2).

Таблица 2

Нечеткие правила и их заключения, моделируемые нейро-нечеткой сетью (см. рис. 3)

№	$P_m(t_i)$	$P_f(t_i)$	$P_T(t_i)$	$w_j$
1	Maneuverable	Little	Little	1
2	Maneuverable	Little	Average	0
3	Maneuverable	Little	Large	0
4	Maneuverable	Big	Little	0
5	Maneuverable	Big	Average	0
6	Maneuverable	Big	Large	0
7	Constant	Little	Little	2
8	Constant	Little	Average	1
9	Constant	Little	Large	0
10	Constant	Big	Little	0
11	Constant	Big	Average	0
12	Constant	Big	Large	0



Узлы третьего слоя рассчитывают относительную степень выполнения каждого нечеткого правила. Узлы  $w_1, w_2, \dots, w_{12}$  четвертого слоя формируют заключения нечетких правил; это значения выхода сети при однозначном выполнении только соответствующего правила (см. табл. 2). Пятый узел суммирует вклады всех правил.

Правило 1 (см. табл. 2) соответствует ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, но судоводитель скорее всего уже начал маневр уклонения (так называемый «желтый» уровень тревоги [7]). Правила 7 и 8 — ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если не начнут маневр уклонения (правило 7 соответствует «красному» уровню тревоги [7]).

Обучение нейро-нечеткой сети (см. рис. 2 и 3) состоит в настройке параметров функций принадлежности и коэффициентов узлов четвертого слоя. Обучение может быть проведено с применением трех различных стратегий [19].

**Стратегия 1.** Обучение полностью экспертным способом. В этом случае все коэффициенты назначаются экспертом.

**Стратегия 2.** Обучение на обучающей выборке с экспертным формированием заключений нечетких правил. В этом случае коэффициенты узлов четвертого слоя назначаются экспертом, а параметры функций принадлежности определяются настройкой системы на обучающей выборке.

**Стратегия 3.** Обучение полностью на обучающей выборке. В этом случае все коэффициенты системы определяются настройкой на обучающей выборке.

Формирование обучающей выборки для рассмотренной задачи достаточно трудоемко и само по себе требует привлечения экспертов. Поэтому здесь ограничимся вариантом стратегии 1, хотя альтернативные способы обучения в принципе возможны. Коэффициенты  $b_j$  задаются табл. 1, а  $w_j$  — табл. 2.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАДАЧИ

Для демонстрации работы описанной системы рассмотрим модельный пример для трех судов. Два из них (I и II) движутся со скоростью 5 м/с прямолинейно и равномерно, третье (III) — маневрирует (рис. 4).

Функции принадлежности были выбраны таким образом, что приобрели вид, показанный на рис. 5. Принимались во внимание следующие соображения. При выборе значений параметров  $a_L$  и  $c_L$  («крутизна» и смещение графиков, см. рис. 5, а)

имелась в виду характерная относительная ошибка оценивания вектора состояния  $\mathbf{s}(t_i)$ . Так, если  $L < 1$ , то это «хорошее» сопровождение, если  $L > 2$ , то это сопровождение с большой ошибкой; в случае  $1 < L < 2$ , особенно при значениях  $L \approx 1,5$  — неопределенная ситуация. При выборе параметров  $a_m$  и  $c_m$  (см. рис. 5, б) принимались во внимание результаты моделирования задачи (6) для маневрирующих и не маневрирующих объектов. Так, при маневрировании с параметрами, характерными для судов, как правило, значения  $m > 7$ , а при равномерном и прямолинейном движении, как правило,  $m < 3$ . Параметры  $a_f$  и  $c_f$  (см. рис. 5, в) выбраны так, чтобы учесть влияние ошибок изме-

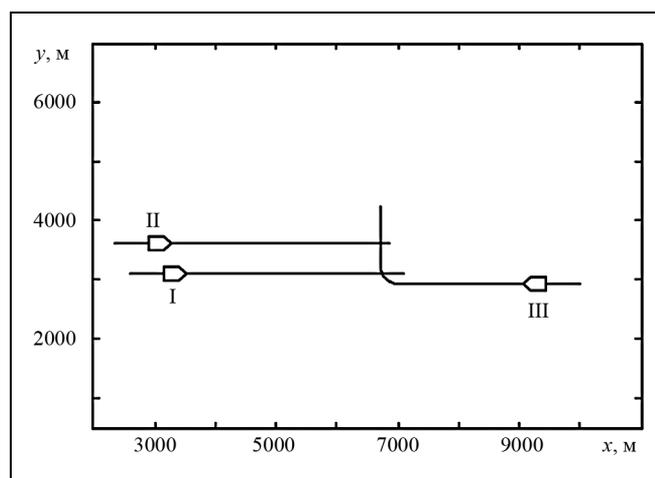


Рис. 4. Моделируемые траектории движения судов

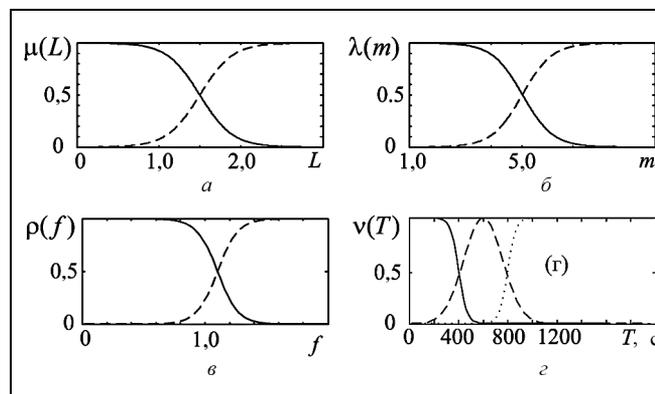


Рис. 5. Функции принадлежности нечеткой системы: а —  $\mu_{Good}(L)$  — сплошная линия,  $\mu_{Bad}(L)$  — штриховая линия; б —  $\lambda_{Manueverable}(m)$  — сплошная,  $\lambda_{Constant}(m)$  — штриховая; в —  $\rho_{Little}(f)$  — сплошная,  $\rho_{Big}(f)$  — штриховая; г —  $v_{Little}(T)$  — сплошная,  $v_{Average}(T)$  — штриховая,  $v_{Large}(T)$  — пунктирная

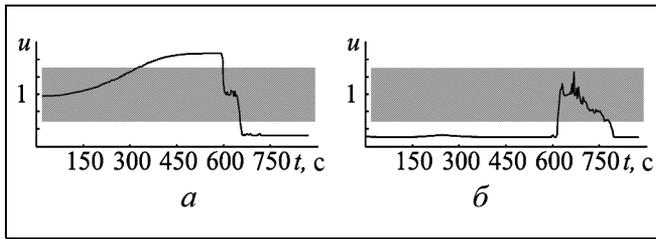


Рис. 6. Работа нейро-нечеткой системы, определяющей уровень опасности «судно — судно»; штриховкой обозначена зона уровня опасности «желтый», выше нее — зона уровня «красный», ниже — зона безопасного движения: *a* — суда I—III; *б* — суда II—III

рений на определение отношения  $f = \eta/\theta$ ; в идеале при  $f < 1$  ситуация опасная, при  $f > 1$  ситуация безопасная. Параметры  $a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T$  (см. рис. 5, *з*) отражают правила и особенности судоходства на конкретной акватории в смысле времени принятия решения и совершения маневра уклонения.

На рис. 6 показан результат решения задачи для судов I—III и II—III — значения величины  $u$ . Так, из рис. 6, *a* видно, что уровень опасности для пары судов I—III устойчив и постоянно повышается по мере их сближения, достигая уровня «красный» при  $t = 350$  с. При  $t = 600$  с судно III начинает маневр уклонения поворотом вправо, после чего уровень опасности быстро снижается до уровня «желтый» и затем до безопасного уровня. Из рис. 6, *б* видно, что суда II и III вначале движутся безопасно. После начала судном III маневра уровень опасности для пары судов II—III скачкообразно увеличивается до «желтого», а затем, по мере продолжения поворота судна III, снижается до безопасного уровня.

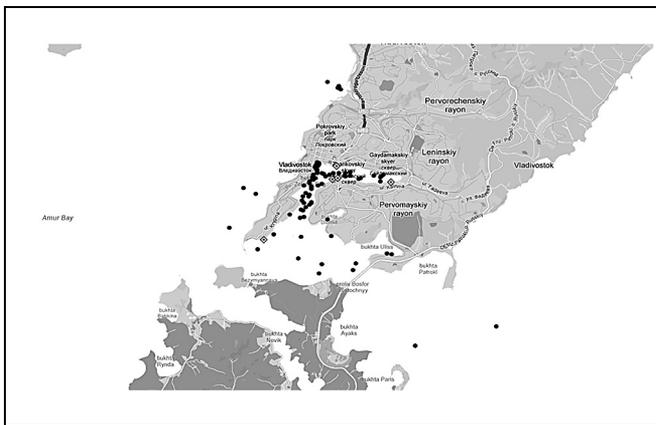


Рис. 7. Движение судов по акватории порта Владивосток: положение судов с тревожными сигналами уровня «желтый»

Снижение уровня тревоги с максимального до «желтого» происходит почти сразу после начала маневрирования, для судов II и III генерация уровня тревоги «желтый» также происходит заблаговременно. Это свидетельствует о способности предлагаемой системы как к предупреждению об опасности, так и к фильтрации ложных тревог. Подтверждается ожидаемый эффект разделения уровней опасности в зависимости от траекторных свойств движения судов и устойчивость решения задачи при больших расстояниях между судами.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанная система исследовалась на реальных данных о движении судов по акватории, прилегающей к порту Владивосток [20]. Приведенный ниже типичный пример был получен по данным о движении судов в течение одних суток в летний период; в это время в зоне ответственности СУДС одновременно находились около 80 судов.

На рис. 7 и 8 показано положение судов на акватории в те моменты времени, когда для них был сгенерирован тревожный сигнал уровня, соответственно, «желтый» и «красный» (черные точки). Видно, что наибольшее число тревог возникает во внутренних портовых водах, где суда располагаются близко друг к другу и высока интенсивность движения малых плавсредств (катеров, буксиров). Оба уровня тревоги имеют место и при движении судов вне портовых вод: Амурском (слева), Уссурийском (справа) заливах, проливе Босфор Восточный. Доля тревожных сигналов уровня «желтый» составляет около 20 %, места их генерации не образуют устойчивых зон.

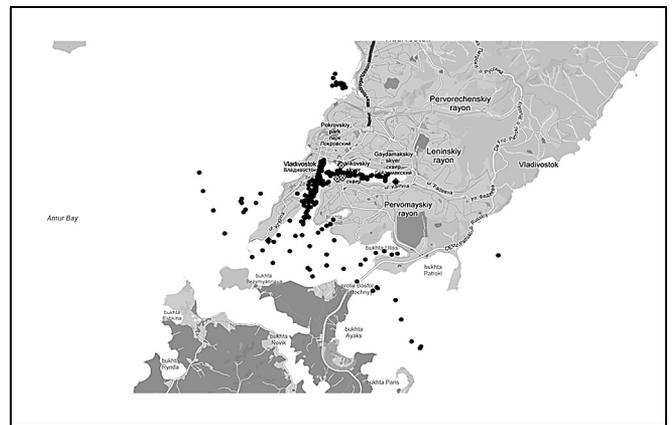


Рис. 8. Движение судов по акватории порта Владивосток: положение судов с тревожными сигналами уровня «красный»



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная интерпретация тревоги с разделением на уровни «красный» и «желтый» интуитивно понятна судоводителям и операторам СУДС, способствует принятию адекватных управленческих решений, повышая безопасность движения. Тревожный сигнал уровня «красный» означает, что необходимо немедленно обратить внимание на ситуацию и принять решение о вмешательстве/невмешательстве в действия судоводителя. Уровень «желтый» означает, что ситуация не является полностью безопасной, но вмешиваться в нее немедленно не следует: скорее всего, судоводитель сам контролирует обстановку. Тот факт, что на конкретной акватории доля ситуаций уровня «желтый» достаточно значительна (20 %), говорит о том, что их выделение способно существенно снизить нагрузку на операторов СУДС и свидетельствует об актуальности рассмотренной задачи для практики.

Модельная интерпретация системы нейро-нечеткой сетью позволяет настраивать функции принадлежности термов таким образом, чтобы учесть особенности трафика конкретной акватории.

В работах, опубликованных ранее, авторами уже рассматривались различные модели многоуровневой системы оценки состояния безопасности. В настоящей работе предложен вариант, где для определения маневра судна скорость изменения углов  $\eta$  и  $\theta$  не оценивается. Вместо этого оценивается степень интенсивности маневрирования судов. Такой подход выгодно отличается хорошей устойчивостью работы системы при больших расстояниях между судами.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Tam Ch.K., Bucknall R.* Collision risk assessment for ships // Journal of Marine Science and Technology. — 2010. — Vol. 15, N 3. — P. 257–270.
2. *Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС—72).* — М.: РКонсульт, 2004. — 80 с.
3. *Жук А.С., Кондратьев С.И.* Методы управления судном на основе множеств достижимости // Навигация и гидрография. — 2013. — № 36. — С. 29–37.
4. *Шубин А.Б., Александров Е.Г., Харченко Г.Г.* Близкое к оптимальному управление траекторией движения объекта // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 73–78.
5. *Дорри М.Х.* Автоматизация управления морскими подвижными объектами // Проблемы управления. — 2009. — № 3.1. — С. 94–102.
6. *Huges C.T.* When is a VTS is not a VTS // The Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62, N 3. — P. 439–442.
7. *Гриняк В.М., Девятисильный А.С.* Прогнозирование опасных ситуаций при управлении движением на море // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2004. — № 3. — С. 127–136.
8. *Гриняк В.М.* Нечеткая система распознавания опасного сближения морских судов // Транспорт: наука, техника, управление. — 2014. — № 6. — С. 6–10.
9. *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, N 3. — P. 455–476.
10. *Бурмака А.И.* Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 1. — С. 20–22.
11. *Wilson P.A., Harris C.J., Hong X.* A Line of sight counteraction navigation algorithm for ship encounter collision avoidance // Journal of Navigation. — 2003. — Vol. 56, N 1. — P. 111–121.
12. *Букатый В.М., Морозова С.Ю.* Нетрадиционный метод выяснения ситуации сближения судов // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 1. — С. 18–21.
13. *Дорожко В.М., Лебедева А.Н.* Экспертные представления об основных ситуационных моделях коллективного движения судов // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — С. 43–49.
14. *Васьков А.С., Васьков В.А., Мироненко А.А.* Взаимосвязь зон навигационной безопасности судна // Вестник гос. морского ун-та им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. — 2013. — № 2. — С. 18–21.
15. *Фарина А., Студер Ф.* Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
16. *Девятисильный А.С., Гриняк В.М.* Нечеткая система экспертных оценок характера движения судна // Информационные технологии. — 2012. — № 8. — С. 66–70.
17. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MatLab. — М.: Горячая линия телеком, 2007. — 288 с.
18. *Коноплев М.А.* Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 2. — С. 34–39.
19. *Бобырь М.В.* Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2014. — № 11. — С. 28–35.
20. *Головченко Б.С., Гриняк В.М.* Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 2. — С. 156–162.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.Б. Рапопортом.*

**Гриняк Виктор Михайлович** — канд. техн. наук, доцент, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток; Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, ✉ Viktor.Grinyak@vvsu.ru,

**Девятисильный Александр Сергеевич** — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, зав. сектором, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток, ✉ devyatis@iacp.dvo.ru.