

НЕЙРОНЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ПРИ МНОГОМОДЕЛЬНОМ СОПРОВОЖДЕНИИ ТРАЕКТОРИИ СУДНА

В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток
690014, Владивосток, ул. Гоголя, 41, (423)2404060, viktor.grinyak@vvsu.ru
Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
690041, Владивосток, ул. Радио, 5, (423)2313549, devyatis@iacp.dvo.ru

Ключевые слова: управление движением судов, сопровождение траектории, радиолокационные измерения, оценка траектории движения, нечеткая система

Аннотация. Рассматривается задача сопровождения траектории движущегося судна в современных системах управления движением на море при обработке навигационных данных двухкоординатной РЛС. Обсуждается проблема качества сопровождения маневрирующих судов. Предлагается алгоритм многомодельного сопровождения судна, основанный на традиционной альфа-бета фильтрации и оценке характера движения судна системой нечеткого вывода. Алгоритм позволяет повысить качество сопровождения, уменьшить вероятность срыва и получить обобщенную вербальную интерпретацию траекторных свойств движения.

Введение

Важнейшей задачей судовождения является обеспечение безопасности судоходства, особенно в зонах высокой интенсивности движения. В акваториях морских портов решением этой задачи занимаются автоматизированные береговые системы управления движением судов (СУДС). Современные СУДС представляют собой наукоёмкие и сложные в техническом и организационном отношении предприятия [1,2], включающие в себя совокупность средств обнаружения, измерения, передачи и обработки данных, анализа, интерпретации, визуализации информации и выработки управляющих решений.

При всей многоаспектности проблем, сопутствующих построению современных СУДС, функциональным ядром таких систем являются их навигационные функции, т.е. функции, решающие задачу определения траекторий объектов, находящихся в зоне ответственности.

Несмотря на развитость современных средств глобальной спутниковой навигации главным информационным элементом СУДС на море, способным обеспечить надёжность и автономность их функционирования, являются двухкоординатные радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора.

При управлении коллективным движением судов для предотвращения столкновений формируется оценка экстраполированных координат и скорости каждого судна, на основе которых определяется возможность опасного сближения. Информационную базу для такой оценки дают специальные алгоритмы сопровождения траектории судна.

Сопровождение траектории представляет собой динамический процесс соотнесения условной точки, принятой за объект, с радиолокационным изображением объекта. Целью процедуры сопровождения является формализация измерительной информации, формирование измерений координат движущегося объекта на протяжении всей его траектории [3].

Актуальной является проблема работы алгоритмов сопровождения на участках маневра судов, характеризующихся несоответствием между реальным движением судна и моделью движения, используемой в алгоритме.

Целью настоящей работы является разработка и исследование многомодельного алгоритма сопровождения траектории движения судна, основанного на применении традиционного α - β фильтра с различным числом измерений, участвующих в оценке. Особенностью и новизной предлагаемого алгоритма является применение нечеткого обнаружителя маневра для определения модели оценки движения судна, максимально соответствующей реальному движению.

Постановка задачи

Рассмотрим следующую дискретную модель движения объекта:

$$\begin{aligned}x(t_{k+1}) &= x(t_k) + v_x(t_k)\tau + q_x(t_k), \\y(t_{k+1}) &= y(t_k) + v_y(t_k)\tau + q_y(t_k),\end{aligned}\tag{1}$$

где k – порядковый номер момента времени, $x(t_k), y(t_k)$ – координаты объекта в момент времени t_k ; $v_x(t_k), v_y(t_k)$ – компоненты вектора скорости объекта, $q_x(t_k), q_y(t_k)$ – компоненты вектора случайных не моделируемых параметров движения, $\tau = t_{k+1} - t_k$.

Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. Тогда модель рассматриваемой задачи можно представить следующим дискретным матричным уравнением «состояние-измерение»

$$\begin{aligned}s(t_{k+1}) &= \Phi s(t_k) + q(t_k), \\z(t_k) &= Hs(t_k) + r(t_k).\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь $s(t_k) = (x(t_k), v_x(t_k), y(t_k), v_y(t_k))^T$ – вектор состояния объекта, включающий его координаты и их производные (T – символ транспонирования), $q(t_k)$ – вектор немоделируемых параметров движения, $z(t_k)$ – вектор измерений, $r(t_k)$ – вектор погрешностей измерений. Имея в виду (1), матричные коэффициенты Φ и H системы уравнений (2) равны, соответственно

$$\Phi = \begin{Bmatrix} 1 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{Bmatrix}, \quad H = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{Bmatrix}.$$

Модель оценивания вектора состояния $s(t_k)$ по измерениям $z(t_k)$ может быть представлена следующим уравнением

$$s(t_{k+1}) = \Phi s(t_k) + K(z(t_k) - H\Phi s(t_k)),\tag{3}$$

где $s(t_k)$ – оценка вектора состояния, K – матричный коэффициент.

Известно множество подходов к выбору матрицы K . В настоящей работе выбор сделан в пользу популярного в практических приложениях α – β алгоритма, основное достоинство которого – низкие требования к вычислительным ресурсам [4]. В этом алгоритме матрица K имеет вид

$$K = \begin{Bmatrix} \alpha & 0 \\ \beta/\tau & 0 \\ 0 & \alpha \\ 0 & \beta/\tau \end{Bmatrix},\tag{4}$$

а коэффициенты α и β выбираются по следующему правилу:

$$\alpha_k = \frac{2(2k+1)}{(k+2)(k+1)}, \quad \beta_k = \frac{6}{(k+2)(k+1)},$$

где k – порядковый номер момента времени в формуле (3).

Пусть J – число измерений (и, соответственно, итераций), участвующих в оценке вектора состояния $s(t_k)$ итерационной процедурой (3), так что $k = \overline{1, J}$. При увеличении J коэффициенты α и β асимптотически уменьшаются до 0. Поэтому алгоритм (3), реализованный с большим J , будет успешно оценивать координаты и скорости объектов, движущихся прямолинейно и равномерно, а для маневрирующих объектов погрешность оценки вектора состояния будет довольно высокой.

Пусть $s_J(t_i)$ – оценка вектора состояния системы в момент времени t_i , полученная итерационным алгоритмом (3) при обработке J последних измерений. Если при этом задача одновременно решается при $J, J-1, J-2, \dots$, и, наконец, только при двух измерениях (минимально возможном их количестве), то тогда в момент времени t_i будем иметь кортеж векторов оценки

$$S_J(t_i) = \{s_2(t_i), s_3(t_i), s_4(t_i), \dots, s_J(t_i)\}. \quad (5)$$

Задача сопровождения траектории сводится, таким образом, к проблеме выбора вектора состояния из кортежа, порождаемого множеством моделей с различными значениями J .

Метод решения задачи

Основным информативным признаком, характеризующим качество сопровождения, является величина невязки измерения, порождаемой той или иной моделью сопровождения.

Введем вектор $\delta z(t_{k+1}) = z(t_{k+1}) - Hs(t_{k+1})$, характеризующий невязку измерения при оценке вектора состояния уравнением (3). Пусть $\|\delta z_J(t_i)\|$ – евклидова норма вектора невязки $\delta z(t_i)$, полученного в момент времени t_i при реализации итерационного алгоритма (3), обрабатывающего J последних измерений. Тогда при оценке вектора состояния в каждый момент времени t_i наряду с кортежем векторов оценки (5) будем иметь кортеж норм векторов невязок

$$\delta_J(t_i) = \{\|\delta z_2(t_i)\|, \|\delta z_3(t_i)\|, \|\delta z_4(t_i)\|, \dots, \|\delta z_J(t_i)\|\} \quad (6)$$

Для анализа качества сопровождения целесообразно перейти от (6) к кортежу относительных величин

$$\Delta_J(t_i) = \{L_2(t_i), L_3(t_i), L_4(t_i), \dots, L_J(t_i)\}. \quad (7)$$

где $L_j(t_i) = \frac{\|\delta z_j(t_i)\|}{\sigma}$, σ – величина среднеквадратичного отклонения погрешности измерений $r(t_k)$ в системе (2).

Введем лингвистическую переменную $Q_j(t_i)$, $j = \overline{2, J}$ «Качество оценки вектора состояния алгоритмом (3–4) в момент времени t_i по j последним измерениям» с термами «good» («хорошее») и «bad» («плохое»). Пусть термы имеют следующие функции принадлежности типа «дополнение», определённые на универсальном множестве $u \in [0, 3]$:

$$\begin{aligned} \mu_{good}(u) &= 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_1(u - c_1))}, \\ \mu_{bad}(u) &= \frac{1}{1 + \exp(-a_2(u - c_2))}, \end{aligned} \quad (8)$$

где a_1, a_2, c_1, c_2 – настраиваемые параметры.

Известно два основных подхода к построению нечеткой системы логического вывода [5]. Первый, машина типа Сугено, характеризуется системой правил с нечетким условием и четким выводом. У второго подхода – машины типа Мамдани, и условие, и вывод нечеткие. Для выбора вектора состояния из кортежа (5) возможно применение обеих нечетких систем [6, 7].

Система типа Сугено

Пусть переменные $Q_j(t_i)$ обрабатываются машиной нечеткого вывода типа Сугено, на вход которой подается кортеж величин (7), а на выходе формируется числовое значение $m_{sug}(t_i)$ –

номер вектора состояния, выбираемого из кортежа (5). Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 1.

Таблица 1

Система правил машины нечеткого вывода типа Сугено

№	$Q_2(t_i)$	$Q_3(t_i)$	$Q_4(t_i)$	...	$Q_{J-2}(t_i)$	$Q_{J-1}(t_i)$	$Q_J(t_i)$	$m_{sug}(t_i)$
1	good	good	good	...	good	good	good	J
2	good	good	good	...	good	good	bad	$J-1$
3	good	good	good	...	good	bad	bad	$J-2$
...
$J-2$	good	good	bad	...	bad	bad	bad	3
$J-1$	good	bad	bad	...	bad	bad	bad	2
J	bad	bad	bad	...	bad	bad	bad	2

Работу нечеткого алгоритма сопровождения траектории можно представить схемой, показанной на рисунке 1. Здесь $L_j(t_i)$ – величины кортежа (7) в момент времени t_i (вход), если $L_j(t_i) > 3$, то вход принимается равным 3; $m(t_i) = m_{sug}(t_i)$ – определённый нечеткой системой F в момент времени t_i номер элемента кортежа (5). Из величин $m(t_i)$ и $m(t_{i-1})$ выбирается максимальное значение m , которое и принимается за окончательное (выход). Если m – не целое число, то оно округляется до ближайшего целого. Выбор максимального из двух соседних $m(t_i)$ необходим для повышения устойчивости работы системы при больших ошибках измерений (для фильтрации случайных выбросов).

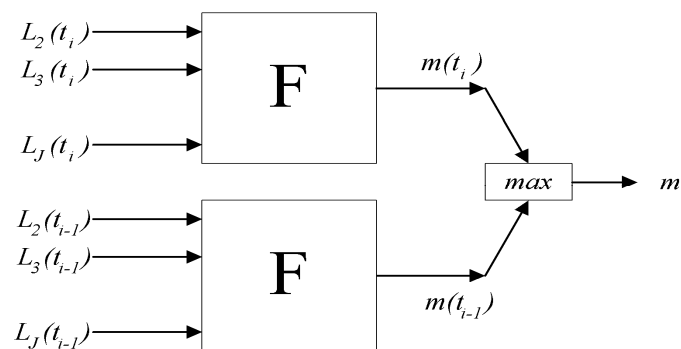


Рис 1. Схема работы алгоритма сопровождения траектории

Настройка описанной системы состоит в задании максимального количества измерений J , параметров функций принадлежности a_1, a_2, c_1, c_2 и величины σ , характеризующей погрешность измерений.

Система типа Мамдани

Для решения задачи с помощью машины логического вывода типа Мамдани введём лингвистическую переменную $P(t_i)$ «Характер движения судна в момент времени t_i » с терминами «high-high-maneuverable» (hhm, «очень высокоманевренное»), «high-maneuverable» (hm, «высокоманевренное»), «low-maneuverable» (lm, «низкоманевренное») и «low-low-maneuverable» (llm, «очень низкоманевренное»). Пусть термины имеют следующие функции принадлежности типа «кластер», определённые на универсальном множестве $v \in [2, J]$:

$$\mu_{hhm}(v) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_3(v - c_3))},$$

$$\mu_{hm}(v) = \exp\left(-\frac{(v-c_4)^2}{a_4}\right),$$

$$\mu_{lm}(v) = \exp\left(-\frac{(v-c_5)^2}{a_5}\right), \quad (9)$$

$$\mu_{llm}(v) = \frac{1}{1 + \exp(-a_6(v-c_6))},$$

где $a_3 - a_6, c_3 - c_6$ - настраиваемые параметры.

Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице 2. На вход машины типа Мамдани подается кортеж величин (7), а на выходе формируется числовое значение $m_{mam}(t_i)$ – вещественное число, характеризующее степень интенсивности маневрирования судна; округляя его до целого будем иметь номер вектора состояния, выбираемого из кортежа (5).

Таблица 2.

Система правил машины нечеткого вывода типа Мамдани

№	$Q_2(t_i)$	$Q_3(t_i)$	$Q_4(t_i)$	...	$Q_{J-2}(t_i)$	$Q_{J-1}(t_i)$	$Q_J(t_i)$	$P(t_i)$
1	good	good	good	...	good	good	good	P_1
2	good	good	good	...	good	good	bad	P_2
3	good	good	good	...	good	bad	bad	P_3
...
$J-1$	good	bad	bad	...	bad	bad	bad	P_{J-1}
J	bad	bad	bad	...	bad	bad	bad	P_J

Работу нечеткого алгоритма сопровождения траектории можно, аналогично для случая системы типа Сугено, представить схемой, показанной на рис. 1.

Здесь $L_j(t_i)$ – величины кортежа (7) в момент времени t_i (вход), если $L_j(t_i) > 3$, то вход принимается равным 3; $m(t_i) = m_{mam}(t_i)$ – определённый нечеткой системой F в момент времени t_i номер элемента кортежа (5), характеризующий степень интенсивности маневрирования судна.

Из величин $m(t_{i-1})$ и $m(t_i)$ выбирается максимальное значение, которое и принимается за окончательное. Настройка описанной системы состоит в задании максимального количества измерений J , параметров функций принадлежности $a_1, \dots, a_6, c_1, \dots, c_6$, значений лингвистической переменной P_i и величины σ , характеризующей погрешность измерений.

Настройка параметров функций принадлежности нечетких систем обоих типов может производиться как экспертным способом, так и путем обучения системы на данных обучающей выборки. В первом случае величины a_1, a_2, c_1, c_2 (для системы типа Сугено) и $a_1, \dots, a_6, c_1, \dots, c_6$ (для системы типа Мамдани) подбираются опытным путем. В другом случае обучение системы происходит методами традиционной нейроинформатики. Обучающая выборка формируется путем моделирования задачи сопровождения либо на наборе эталонных траекторий, либо на наборе реальных траекторий движения судов, характерных для конкретной акватории.

Результаты численного моделирования

Представленные ниже результаты были получены для случая настройки параметров нечетких систем экспертным способом.

При моделировании задачи было принято, что информационной базой СУДС является двухкоординатный радар кругового обзора (например, типа Raytheon) с периодом обращения $3с$ и разрешением по углу и дальности, соответственно, $\Delta\varphi = 0.03^\circ$ и $\Delta r = 6$ м. Максимальное количество измерений было принято равным $J = 10$.

Величину σ трудно задать априорно. Суть проблемы в том, что радиолокационный образ судна при высоком разрешении радара представляет собой не одиночное значение амплитуды, а целую матрицу таких амплитуд, сложно распределённых и зависящих от ориентации судна и расположения на нем локальных источников отраженного эхо-сигнала [8] (рис. 2). Соответственно и вероятностные характеристики ошибок измерений $r(t_k)$ можно априорно оценить только приблизительно, с точностью до порядка величин. Поэтому величину σ предлагается приблизительно оценивать по следующей формуле:

$$\sigma_k = \frac{\sum_{i=1}^k \|\delta z_2(t_i)\|}{k},$$

где k – порядковый номер момента времени, прошедшего от начала сопровождения судна.

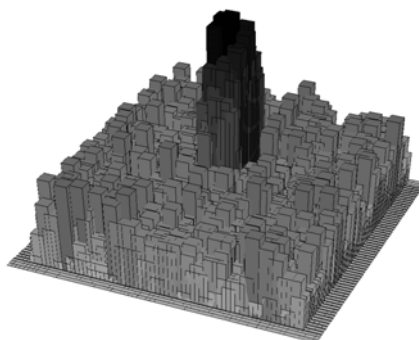


Рис 2. Отраженный радиолокационный эхо-сигнал судна на фоне эхо-сигналов подстилающей поверхности (моря)

На рис. 3 показана моделируемая траектория движения судна. Вначале судно движется прямолинейно и равномерно, а затем совершает манёвр – поворот с радиусом 300м. (такие кинематические свойства вполне характерны для современных судов небольшой размерности).

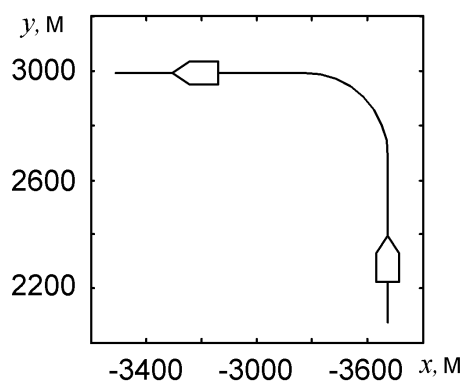


Рис 3. Траектория движения судна

Результаты моделирования системы типа Сугено. Параметры функций принадлежности (8) задавались равными $a = 5, c = 1.5$. На рисунке 4 показан результат решения задачи сопровождения для судна, движущегося по изображенной траектории со скоростью 10 м/с (левая колонка рисунков) и 20 м/с (правая колонка рисунков). Здесь t – время, прошедшее от начала сопровождения траектории, δ – длина вектора погрешности оценивания положения судна по мере его движения (рис. 4а и 4б). В данном случае величина δ дает представление о ширине строба, необходимого для устойчивого сопровождения объекта. Так, при скорости

судна 10 м/с минимально необходимый радиус строба для него ≈ 22 м., а при скорости судна 20 м/с минимально необходимый радиус строба ≈ 27 м. Такие значения лишь незначительно превышают характерные геометрические размеры маломерного судна, что дает возможность устойчиво сопровождать его даже в насыщенном судопотоке.

Рисунки 4в и 4г показывают значение величины m по мере движения судна. Видно, что на прямолинейной траектории алгоритм работает при максимальном $m=10$, а при маневре количество измерений, участвующих в оценке параметров движения судна уменьшается до 5–6 (рис. 4в) и 3–4 (рис. 4г). Алгоритм быстро реагирует на изменение характера движения судна (начало и окончание маневрирования).

Рис. 4д и 4е дают значение оценки величины σ , используемой при работе алгоритма. Видно, что по прошествии приблизительно 1 минуты (что соответствует 20 измерениям) значение σ становится достаточно стабильным.

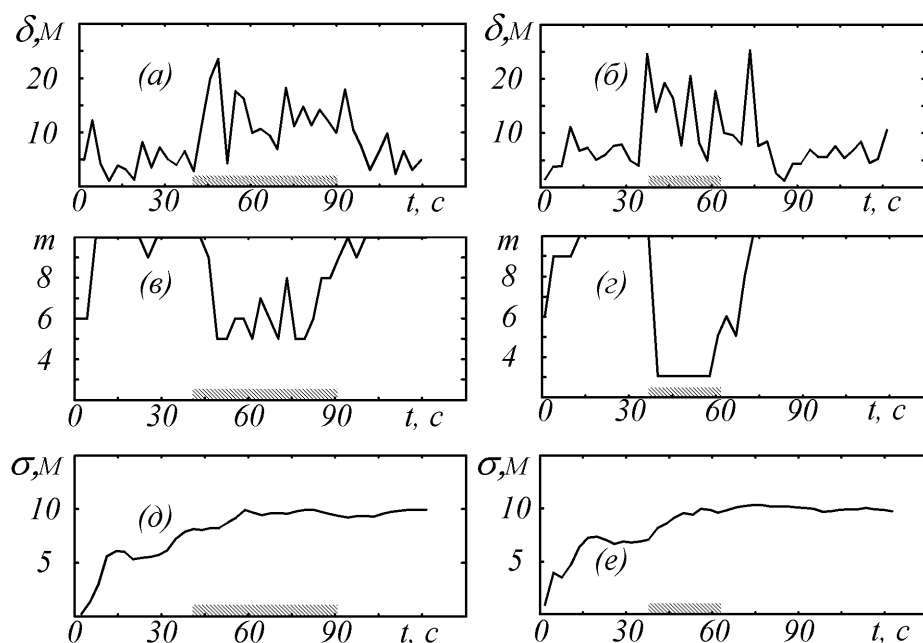


Рис 4. Работа алгоритма сопровождения (система Сугено); штрихами по оси абсцисс показан участок маневрирования судна

Результаты моделирования системы типа Мамдани

Заданные значения P_j лингвистической переменной $P(t_i)$ приведены в таблице 3. Заданные значения параметров функций принадлежности (8) и (9) приведены в таблице 4.

Таблица 3.

Значения лингвистической переменной P_j

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_j	llm	llm	lm	lm	lm	hm	hm	hm	hhm	hhm

Таблица 4.

Параметры функций принадлежности системы типа Мамдани

i	a_i	c_i
1	5.0	1.5
2	5.0	1.5
3	6.0	3.0
4	2.0	4.5
5	2.0	7.5
6	6.0	9.0

На рис. 5 показан результат решения задачи сопровождения для судна, движущегося по изображенной траектории со скоростью 10 м/с (левая колонка рисунков) и 20 м/с (правая колонка рисунков). Здесь t – время, прошедшее от начала работы алгоритма, m – определенное по мере движения судна значение наиболее подходящего количества измерений для сопровождения траектории (рис. 5а и 5б). В данном случае m близко к максимальному значению (около 10) на прямолинейном участке траектории и уменьшается до значений ≈ 3.5 –5 при повороте на скорости 10 м/с, и до ≈ 2.5 при повороте на скорости 20 м/с. При этом алгоритм достаточно быстро реагирует на изменение характера движения судна (не более 15 секунд, участок [63, 78] секунд на рис. 5б).

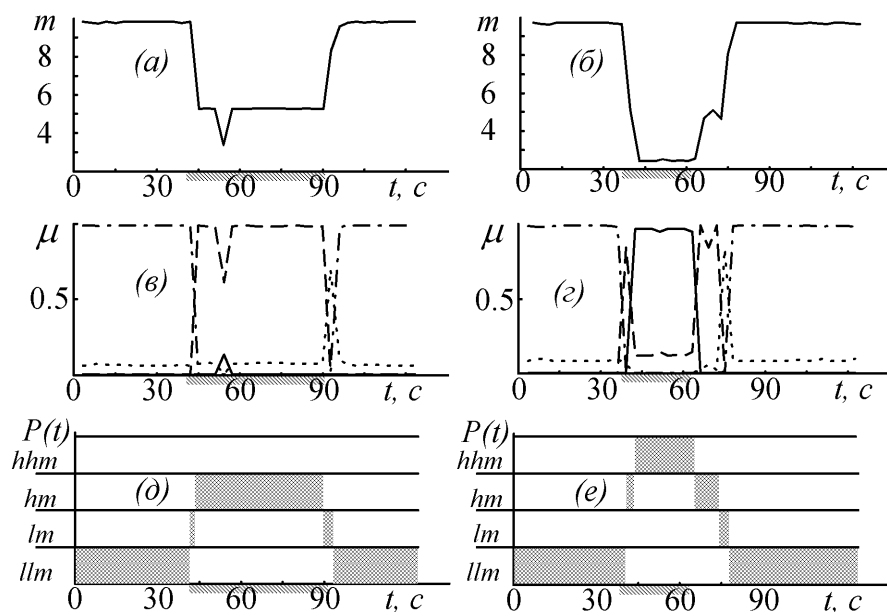


Рис 5. Работа алгоритма сопровождения (система Мамдани); штрихами по оси абсцисс показан участок маневрирования судна

Рис. 5в и 5г показывают значения функций принадлежности термов «hhm» (сплошная линия), «hm» (пунктир), «lm» (точки) и «llm» (точка-пунктир) по мере движения судна. Так, при движении со скоростью 10 м/с на участке [0, 40] секунд движение с наивысшей степенью оценено как «очень низкоманевренное», на участке (40, 43) – как «низкоманевренное», на участке [43, 90] – как «высокоманевренное» и т.д. (рис. 5в). Соответствующие термы с максимальными значениями функции принадлежности приведены на рисунках 5д и 5е, которые иллюстрируют обобщённую вербальную лингвистическую интерпретацию траекторных свойств движения в разрезе значений «очень высокоманевренное», «высокоманевренное», «низкоманевренное» и «очень низкоманевренное».

Заключение

В заключение перечислим основные результаты настоящей статьи. В работе сформулированы методологические основы и дана концепция решения задачи многомодельного сопровождения траектории с использованием нечеткой модели классификации характера движения судна, ориентированной на реализацию в качестве обнаружителя маневра и оценку интенсивности маневрирования в лингвистических переменных. Предложен нечеткий алгоритм лингвистической оценки степени маневра, основанный на сопровождении траектории судна классическим α – β алгоритмом с различной степенью фильтрации и обработке параметров сопровождения машиной нечеткого вывода типа Сугено и типа Мамдани. На модельном примере продемонстрирована конструктивность и эффективность предлагаемой методики.

Одним из преимуществ предлагаемого подхода является устойчивость сопровождения траектории высокоманевренных судов стробом небольшой ширины. Последнее качество приобретает существенный вес при работе СУДС в условиях летней навигации, когда движение маломерных скоростных высокоманевренных судов (прогулочных катеров, яхт и т.п.)

приобретает характер разнонаправленных судопотоков с предельными значениями насыщенности и интенсивности.

Предлагаемый в работе новый подход к обнаружению маневра, связанный с классификацией наблюдаемых объектов по степени интенсивности маневрирования с помощью аппарата нечеткой логики удобен для поддержки вербального принятия решений операторами СУДС и судоводителями. Маневрирующие и не маневрирующие объекты с точки зрения оценки безопасности имеют ряд принципиальных различий [9, 10]. Во-первых, при внешнем наблюдении полностью достоверный прогноз траектории маневрирующего объекта невозможен. Во-вторых, если исходить из принятого на практике положения, что маневрирование судна, как правило, свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией, то для маневрирующих объектов вербальный уровень опасности ниже, чем для не маневрирующих. В связи с этим обобщенные лингвистические представления о характере движения того или иного судна могут быть использованы при распознавании опасных ситуаций бортовой или береговой СУДС с выделением различных уровней опасности ситуации типа «очень опасная», «опасная», «почти безопасная» и т.п.

Перспективным направлением дальнейших исследований по теме представляется изучение поведения алгоритма сопровождения при обучении описанных нечетких систем на обучающей выборке, полученной путем моделирования различных классов траекторий движения судна.

Результаты работы ориентированы на расширение функциональных возможностей существующих береговых и бортовых систем управления движением судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ОАО Норфес [Электронный ресурс]. — Доступ: <http://www.norfes.ru/> (10.08.2012).
2. Группа компаний ТРАНЗАС [Электронный ресурс]. — Доступ <http://www.transas.ru/> (10.08.2012).
3. **Кузьмин С. З.** Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Сов. Радио. 1974. 431 с.
4. **Benedict T. R., Bordner G.R.** Synthesis of an optimal set of radar track-while-scan smoothing equations// IRE Trans, on AC-1, July 1962, p. 27–32.
5. **Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М.: Физматлит. 2001. 224 с.
6. **Гриняк В.М., Трофимов М.В.** Нечеткое сопровождение траектории движения судна // Журнал университета водных коммуникаций. 2012. №1. С. 119–124.
7. **Гриняк В.М., Трофимов М.В.** Оценка характера движения морских судов в лингвистических переменных // Научно-техническая информация. Сер.2: Информационные процессы и системы. 2012. №5. С. 22–26.
8. **Дорожко В.М.** Имитационная модель радиолокационного эхо-сигнала // Дальневосточный математический журнал. 2001. №1. С. 98–113.
9. **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.
10. **Васьков В.А., Мироненко А.А.** Формализация знаний о маневрировании судна в портовых водах на основе нечетких функций // Эксплуатация морского транспорта. 2010. №2. С. 39–42.