

В. М. Гриняк<sup>1</sup>, М. В. Трофимов<sup>2</sup>

## МУЛЬТИМОДЕЛЬНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖУЩИХСЯ СУДОВ С НЕЧЕТКИМ КРИТЕРИЕМ ДЕТЕКЦИИ МАНЕВРА

---

---

*Рассматривается задача сопровождения траектории объекта в современных системах управления движением на море при обработке навигационных данных двухкоординатной РЛС кругового обзора. Обсуждается проблема устойчивости сопровождения малоразмерных маневрирующих судов по отношению к срыву. Предлагается модельная интерпретация традиционных алгоритмов оптимальной фильтрации, основанная на детекции маневра судна системой нечеткого вывода типа Сугено, повышающая устойчивость сопровождения и уменьшающая вероятность срыва.*

**Ключевые слова:** управление движением судов, сопровождение траектории, радиолокационные измерения, нечеткая система типа Сугено, оценка траектории движения.

### Введение

Современные береговые системы управления движением судов (СУДС) представляют собой наукоёмкие и сложные в техническом и организационном отношении предприятия [8, 9, 11]. В настоящее время под такими системами принято понимать 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

---

<sup>1</sup> © Виктор Михайлович Гриняк, зав. кафедрой информационных систем и прикладной информатики Института информатики, инноваций и бизнес-систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, Приморский край, 690014, Россия, E-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

<sup>2</sup> © Максим Валерьевич Трофимов, ассистент кафедры информационных систем и прикладной информатики Института информатики, инноваций и бизнес-систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, Приморский край, 690014, Россия, E-mail: budzex@yandex.ru.

главным информационным элементом СУДС на море, способным обеспечить надёжность и автономность их функционирования, являются двухкоординатные радиолокационные станции (РЛС) кругового обзора.

Согласно современным представлениям основной технологический цикл решения навигационных задач последовательно включает в себя:

- оцифровку измерительной информации РЛС и «введение» её в память ЭВМ;
- обнаружение, захват и сопровождение объектов;
- наблюдение объектов и прогнозирование опасных ситуаций;
- визуализацию навигационной информации [2, 3].

Под оцифровкой измерительной информации в данном случае понимается преобразование радиолокационного эхо-сигнала с помощью аналогоцифровых устройств и представление радиолокационного образа зоны ответственности в виде матрицы амплитуд.

Обнаружение цели – это выделение полезного отражённого радиосигнала на фоне помех и его интерпретация как свидетельства присутствия в той или иной области навигационного пространства интересующего систему физического объекта.

Сопровождение объекта – динамический процесс соотнесения условной точки, принятой за объект, с радиолокационным изображением объекта. Инициация этого процесса называется захватом объекта, а произвольное (аварийное) прекращение такого процесса – срывом сопровождения (срывом захвата). С процессом сопровождения тесно связано понятие строга, а именно – с тем обстоятельством, что протяжённый физический объект необходимо отождествить с точкой. Строб – область радиолокационного образа, используемая для преобразования в точку, отождествляемую затем с измеренными координатами объекта. Процедура такого преобразования называется стробированием. В простейшем варианте стробирование представляет собой определение «центра масс» амплитуд отраженного сигнала в области строга; для описания линейных размеров этой области принят термин «ширина строга». Главное назначение совокупности процедур обнаружения, захвата, стробирования и сопровождения состоит в формализации измерительной информации, формировании измерений координат движущегося объекта на протяжении всей его траектории [7].

Наблюдение объекта – процедура оценки собственно навигационных параметров объекта, в частности координат и их производных. В отличие от сопровождения главный смысл, который несёт в себе процедура наблюдения, – определение характеристик объекта, недоступных непосредственному измерению (например, скорости). Основным назначением получаемых при этом об объекте данных является их явное или неявное использование для прогнозирования навигационной обстановки в зоне от-

ветственности СУДС, выработки тревожных сигналов при опасном сближении судов [1, 11].

Визуализация навигационной информации – совокупность процессов, обеспечивающих интерфейс центрального элемента системы – оператора.

Основной проблемой, возникающей при сопровождении объекта (решению именно этой задачи посвящена настоящая работа), является обеспечение устойчивости этого процесса по отношению к срыву. Если отбросить случаи аппаратных сбоев и радарных помех различной природы, то основная причина срыва сопровождения – интенсивное маневрирование объектов, приводящее к «уходу» объекта за пределы строга. Одним из путей разрешения этой проблемы считают увеличение ширины строга. Вместе с тем, строб не может быть слишком большим – в него не должно «попадать» более одного объекта. Таким образом, максимальная ширина строга ограничена характерным расстоянием между объектами.

Последнее ограничение 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. Для СУДС, обслуживающей такую акваторию, становится актуальной разработка специальных алгоритмов сопровождения, сохраняющих устойчивость при сопровождении высокоманевренных объектов стробом небольшой ширины. В настоящей работе рассматривается модель задачи сопровождения, уменьшающая вероятность срыва и основанная на адаптации традиционных алгоритмов оптимальной фильтрации к модельным представлениям современной теории нечетких систем.

### Модельные представления и постановка задачи

Рассмотрим следующую модель движения объекта:

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

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

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

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= \Phi x_k + q_k, \\ z_k &= Hx_k + r_k, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x_k = (x(k), v_x(k), y(k), v_y(k))^T$  – вектор состояния объекта, включающий его координаты и их производные (Т – символ транспонирования),  $q_k$  – вектор немоделируемых параметров,  $z_k$  – вектор измерений,  $r_k$  – вектор погрешностей измерений. Имея в виду (1), матричные коэффициенты  $\Phi$  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  $x_k$  по измерениям  $z_k$  может быть представлена следующим уравнением:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi \hat{x}_k + K(z_{k+1} - H\hat{x}_{k+1}), \quad (3)$$

где  $\hat{x}_k$  – оценка вектора состояния,  $K$  – матричный коэффициент.

Известно множество подходов к выбору матрицы  $K$ . В настоящей работе выбор сделан в пользу популярного в практических приложениях  $\alpha - \beta$  алгоритма, основное достоинство которого – низкие требования к вычислительным ресурсам [10].

В этом алгоритме матрица  $K$  имеет вид

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ \beta/\tau & 0 \\ 0 & \alpha \\ 0 & \beta/\tau \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Сходимость алгоритма обеспечивается выполнением условия  $0 < \alpha \leq 1$ ,  $0 < \beta \leq 1$ . Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются исходя из требований чувствительности алгоритма к немоделируемым манёврам судна  $q_k$  и ошибкам измерений  $r_k$ . Т. Бенедикт и Г. Борднер считают, что соотношение коэффициентов  $\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha)$  является оптимальным [12].

Примем, что коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  в формуле (4) 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 итераций соответственно), участвующих в оценке вектора состояния  $x_k$  итерационной процедурой (3), отсюда  $k = \overline{1, J}$ . При увеличении  $J$  коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  асимптотически уменьшаются до 0, поэтому алгоритм (3), реализованный с большим  $J$ , будет успешно сопровождать объекты, движущиеся прямолинейно и равномерно, но он не сможет быть использован для сопровождения маневрирующих объектов.

Пусть  $\hat{x}_i^{(J)}$  – оценка вектора состояния системы в момент времени  $t_i$ , полученная итерационным алгоритмом (3) при обработке  $J$  последних измерений. Если 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

$$\hat{X}_i^{(J)} = \{ \hat{x}_i^{(2)}, \hat{x}_i^{(3)}, \hat{x}_i^{(4)}, \dots, \hat{x}_i^{(J)} \}. \quad (5)$$

Задача сопровождения траектории сводится, таким образом, к проблеме выбора вектора состояния из кортежа.

### Метод решения задачи

Введем вектор  $\delta z_{k+1} = z_{k+1} - H\hat{x}_{k+1}$ , характеризующий невязку измерения при оценке вектора состояния уравнением (3). Пусть  $\|\delta z\|_i^{(J)}$  – евклидова норма вектора невязки  $\delta z_{k+1}$ , полученного в момент времени  $t_i$  при реализации итерационного алгоритма (3), обрабатывающего  $J$  последних измерений. Таким образом, при сопровождении объекта в каждый момент времени  $t_i$  наряду с кортежем векторов оценки (5) будем иметь кортеж норм векторов невязок

$$\delta_i^{(J)} = \{ \|\delta z\|_i^{(2)}, \|\delta z\|_i^{(3)}, \|\delta z\|_i^{(4)}, \dots, \|\delta z\|_i^{(J)} \}. \quad (6)$$

Элементы кортежа (6) являются, по сути, основным информативным признаком, который характеризует качество сопровождения объекта ал-

горитмом (3–4) с тем или иным значением  $J$ . Для анализа качества сопровождения целесообразно перейти к кортежу относительных величин

$$\Delta_i^{(j)} = \{L_i^{(2)}, L_i^{(3)}, L_i^{(4)}, \dots, L_i^{(j)}\}, \quad (7)$$

где  $L_i^{(j)} = \frac{\|\delta z\|_i^{(j)}}{\sigma}$ ,  $\sigma$  – величина, характеризующая среднее квадратичное отклонение погрешности измерений  $r_k$  в системе (2).

Введем лингвистическую переменную  $Q_i^{(j)}$  «Качество сопровождения алгоритмом (3–4) в момент времени  $t_i$  по  $J$  последним измерениям» с терминами «Хорошее» и «Плохое». Пусть термины имеют следующие функции принадлежности, определённые на универсальном множестве  $u \in [0,3]$  (рис. 1):

$$\mu_{\text{хорошее}}(u) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a(u - c))},$$

$$\mu_{\text{плохое}}(u) = \frac{1}{1 + \exp(-a(u - c))}.$$

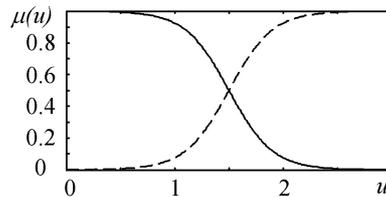


Рис. 1. Функции принадлежности термов «Хорошее» (сплошная линия) и «Плохое» (пунктир)

Пусть переменные  $Q_i^{(j)}$  обрабатываются машиной нечеткого вывода Сугено [6], на вход которой подается кортеж величин (7), а на выходе формируется числовое значение  $m_i$  – номер вектора состояния, выбираемого из кортежа (5). Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в табл. 1.

Таблица 1

**Система правил машины нечеткого вывода Сугено**

| №       | $Q_i^{(2)}$ | $Q_i^{(3)}$ | $Q_i^{(4)}$ | ... | $Q_i^{(j-1)}$ | $Q_i^{(j-1)}$ | $Q_i^{(j)}$ | $m$     |
|---------|-------------|-------------|-------------|-----|---------------|---------------|-------------|---------|
| 1       | Хорошее     | Хорошее     | Хорошее     | ... | Хорошее       | Хорошее       | Хорошее     | $J$     |
| 2       | Хорошее     | Хорошее     | Хорошее     | ... | Хорошее       | Хорошее       | Плохое      | $J - 1$ |
| 3       | Хорошее     | Хорошее     | Хорошее     | ... | Хорошее       | Плохое        | Плохое      | $J - 2$ |
| ...     | ...         | ...         | ...         | ... | ...           | ...           | ...         | ...     |
| $J - 1$ | Хорошее     | Хорошее     | Плохое      | ... | Плохое        | Плохое        | Плохое      | 3       |

|       |         |        |        |     |        |        |        |   |
|-------|---------|--------|--------|-----|--------|--------|--------|---|
| $J$   | Хорошее | Плохое | Плохое | ... | Плохое | Плохое | Плохое | 2 |
| $J+1$ | Плохое  | Плохое | Плохое | ... | Плохое | Плохое | Плохое | 2 |

Работу нечеткого алгоритма сопровождения траектории можно, таким образом, окончательно представить схемой, показанной на рис. 2. Здесь  $L_i^{(j)}$  – величины кортежа (7) в момент времени  $t_i$  (вход), если  $L_i^{(j)} > 3$ , то вход принимается равным 3;  $m_i$  – определённый системой Сугено  $S$  в момент времени  $t_i$  номер элемента кортежа (5). Из величин  $m_i$  и  $m_{i-1}$  выбирается максимальное значение, которое и принимается за окончательное (выход). Если  $m$  – не целое число, то оно округляется до ближайшего целого. Выбор максимального из двух соседних  $m_i$  необходим для повышения устойчивости работы системы при больших ошибках измерений (для фильтрации случайных выбросов).

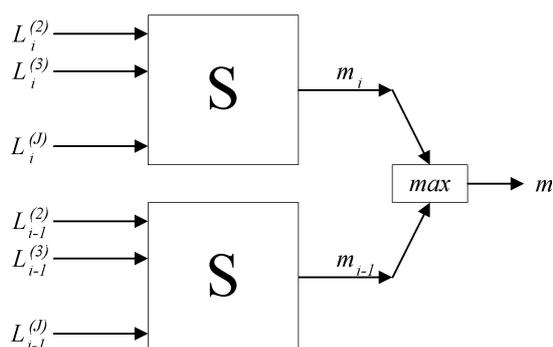


Рис. 2. Схема работы нечеткого алгоритма сопровождения траектории

Настройка описанной системы состоит в задании максимального количества измерений  $J$ , параметров функций принадлежности  $a, c$  и величины  $\sigma$ , характеризующей погрешность измерений.

### Результаты численного моделирования

При моделировании задачи было принято, что информационной базой СУДС является двухкоординатный радар кругового обзора (например, типа Raytheon) с периодом обращения 3 с и разрешением по углу и дальности  $\Delta\varphi = 0.03^\circ$  и  $\Delta r = 6$  м соответственно. Максимальное количество измерений было принято равным  $J = 10$ . Параметры функций принадлежности задавались равными  $a = 5, c = 1.5$  (в данном случае параметры задаются экспертом, система не подвергается настройке на обучающей выборке).

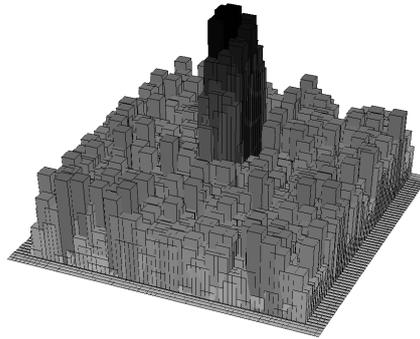


Рис. 3. Отраженный радиолокационный эхо-сигнал судна на фоне эхо-сигналов подстилающей поверхности (моря)

Величину  $\sigma$  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 [4] (рис. 3). Соответственно, вероятностные характеристики ошибок измерений  $r_k$  можно априорно оценить только приблизительно с точностью до порядка величин. Поэтому величину  $\sigma$  предлагается приблизительно оценивать по следующей формуле:

$$\hat{\sigma}_k = \frac{\sum_{i=1}^k \|\delta z_i\|^{(2)}}{k},$$

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

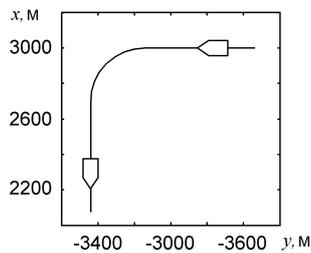


Рис. 4. Траектория движения судна

На рисунке 4 показана моделируемая траектория движения судна. Вначале судно движется прямолинейно и равномерно, а затем совершает манёвр – поворот с радиусом 300 м. (Такие кинематические свойства вполне характерны для современных маломерных судов.)

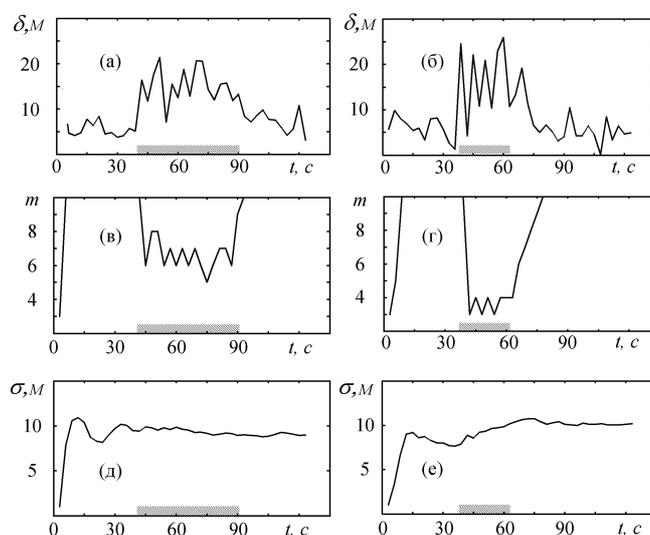


Рис 5. Работа алгоритма сопровождения  
(штрихами по оси абсцисс показан участок маневрирования судна)

На рисунке 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 сопровождения траектории,  $\delta$  – погрешность оценивания положения судна по мере его движения (рис. 5а и 5б). В данном случае величина  $\delta$  дает представление о ширине строба, необходимого для устойчивого сопровождения объекта. Так, при скорости судна 10 м/с минимально необходимый радиус строба для него  $\approx 22$  м, а при скорости судна 20 м/с минимально необходимый радиус строба  $\approx 27$  м. Такие значения лишь незначительно превышают характерные геометрические размеры маломерного судна, что дает возможность устойчиво сопровождать его даже в насыщенном судопотоке.

Рисунки 5в и 5г 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. 5в) и 3–4 (рис. 5г). Алгоритм быстро реагирует на изменение характера движения судна (начало и окончание маневрирования).

Рисунки 5д и 5е дают значение оценки величины  $\sigma$ , используемой при работе алгоритма. Видно, что по прошествии приблизительно 1 минуты (что соответствует 20 измерениям) значение  $\sigma$  становится достаточно стабильным.

## Заключение

При решении задачи сопровождения для насыщенных потоков маломерных маневрирующих судов повышается вероятность срыва сопровожде-

ния и, соответственно, нарушения оптимальных режимов работы СУДС при обеспечении безопасности коллективного движения. Предложенная в работе нечеткая модельная интерпретация задачи сопровождения судна позволяет, как показывают результаты эксперимента, существенно снизить вероятность срыва сопровождения стробом небольшого радиуса.

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

---

1. Гриняк В.М. Идентификация опасных ситуаций в системах управления движением судов // Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС. – 2010. – №4. – С. 197-207.
2. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. и др. Система экспертных оценок состояния безопасности на морских акваториях // Информационные технологии. – 2004. – №11. – С. 48-53.
3. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Лоскутов Н.В. Информационные модели систем управления безопасностью движения в насыщенных судопотоках // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2007. – № 1. – С. 114-128.
4. Дорожко В.М. Имитационная модель радиолокационного эхосигнала // Дальневосточный математический журнал. – 2001. – №1. – С. 98 – 113.
5. Каретников В.В., Сикарев А.А. Совершенствование системы управления судами с использованием автоматизированных идентификационных систем на внутренних водных путях // Журнал университета водных коммуникаций. – 2010. – №3. – С. 93–96.
6. Круглов В.В., Длин М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
7. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1974. – 431 с.
8. Модеев Р.Н. СУДС – ядро информационной системы порта // Морские порты. – 2010. – №8. – С. 27 – 29.
9. ОАО Норфес [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.norfes.ru/>.
10. Тихонов В.И., Теплинский И.С. Квазиоптимальное слежение за маневрирующими объектами // Радиотехника и электроника. – 1989. – Т.34. №4. – С. 792–797.
11. Юдин Ю.И. Механизм предвидения в организационно-технических системах управления судовыми ключевыми операциями // Наука и техника транспорта. – 2007. – №1. – С. 74–81.
12. 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.