

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ СОПРОВОЖДЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

М.В. Трофимов, аспирант, ассистент кафедры ИСПИ  
Д.С. Шматков, III курс, Институт информатики, инноваций и бизнес-систем  
В.М. Гриняк - научный руководитель, канд. техн. наук, доцент кафедры ИСПИ

*ФГБОУ ВПО Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток*

### **введение**

Современные береговые системы управления движением судов (СУДС) представляют собой наукоёмкие и сложные в техническом и организационном отношении предприятия [1, 2, 3]. 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 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 [4, 5]:

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

Под оцифровкой измерительной информации в данном случае понимается преобразование радиолокационного эхо-сигнала с помощью аналого-цифровых 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, 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 - формализация измерительной информации, формирование измерений координат движущегося объекта на протяжении всей его траектории [6].

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 ответственности СУДС, выработки тревожных сигналов при опасном сближении судов [3, 7].

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. В настоящей работе представлены результаты исследования поведения алгоритма сопровождения с различной степенью фильтрации на траекториях характеризующихся различной степенью маневренности объекта. За основу исследования взята работа, рассматривающая модель задачи сопровождения, основанную на традиционных алгоритмах оптимальной фильтрации [8].

### модельные представления и постановка задачи

Рассмотрим следующую модель движения объекта

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

здесь  $k$  - 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»

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

Здесь  $x_k = (x(k), v_x(k), y(k), v_y(k))^T$  - вектор состояния объекта, включающий его координаты и их производные ( $T$  – 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

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

Здесь  $\hat{x}_k$  - 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 [9]. В этом алгоритме матрица  $K$  имеет вид

$$K = \begin{vmatrix} \alpha & 0 \\ \beta/\tau & 0 \\ 0 & \alpha \\ 0 & \beta/\tau \end{vmatrix}.$$

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  $r_k$ . Показано [10], что соотношение коэффициентов  $\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha)$  является оптимальным.

Примем, что алгоритм (3) может быть реализован с коэффициентами  $\alpha$  и  $\beta$ , значения которых выбираются по следующему правилу:

$$\alpha_m = \frac{2(2m+1)}{(m+2)(m+1)}, \quad \beta_m = \frac{6}{(m+2)(m+1)},$$

где  $m$  - целое положительное число, характеризующее степень фильтрации алгоритма (3). При увеличении  $m$  коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  асимптотически уменьшаются до 0, поэтому алгоритм (3), реализованный с большим  $m$  будет успешно сопровождать объекты, движущиеся прямолинейно и равномерно, но он не сможет быть использован для сопровождения маневрирующих объектов. Задача сопровождения траектории сводится, таким образом, к проблеме выбора такой степени фильтрации  $m$ , которая реализует сопровождение конкретной траектории движения наилучшим образом (с наименьшей погрешностью).

### результаты численного моделирования

В работе были смоделированы траектории движения объектов, характеризующиеся различной степенью маневренности, на которых исследовалось поведение алгоритма сопровождения (3) с различной степенью фильтрации  $m$ . Путем анализа средней погрешности оценивания координат объекта была получена информация о значениях  $m$ , реализующих наилучшее сопровождение того или иного участка траектории.

На рисунке 1 показано качество сопровождения маневрирующего объекта по мере его движения. До момента времени  $t=100$  секунд объект движется прямолинейно и равномерно со скоростью 3 м/с, а затем совершает поворот с радиусом циркуляции 300 метров и завершает его в момент времени  $t=300$  секунд. Затем объект продолжает движение прямолинейно и равномерно. При моделировании было принято, что погрешность измерения координат (величина  $r_k$ ) равномерно распределена в интервале  $[-5, 5]$  метров. Сопровождение объекта происходит алгоритмом (3) с различными значениями  $m$  (от 2 до 10). Здесь  $\delta$  - среднее (оцененное по 5000 реализациям) расстояние между точками истинного и оцененного положения объекта. Из рисунка видно, что наименьшая погрешность оценивания координат объекта при манёвре у алгоритма со степенью фильтрации  $m = 5$ , а наименьшая погрешность при прямолинейном и равномерном движении со степенью фильтрации  $m = 10$ . Алгоритм быстро реагирует на изменение характера движения судна (начало и окончание маневрирования).

На рисунке 2 изображена соответствующая рисунку 1 траектория движения объекта, на которой цветом и стрелками показаны значения  $m$ , обеспечивающие наилучшее сопровождение. Из рисунка видно, что имеется четкая зависимость между характеристиками маневренности объекта и оптимальной степенью фильтрации алгоритма. Появление коротких участков траектории со значением  $m$ , отличающимся на единицу от применяемого на соседних участках обусловлено случайными выбросами ошибок измерения.

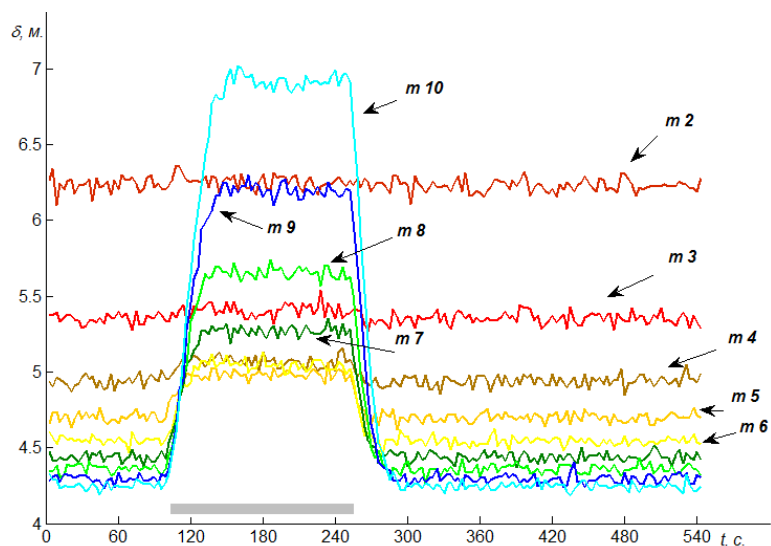


Рис 1. Графики средней погрешности оценивания координат при сопровождении маневрирующего объекта алгоритмом с различной степенью фильтрации, штриховой линией по оси абсцисс показан участок маневрирования судна

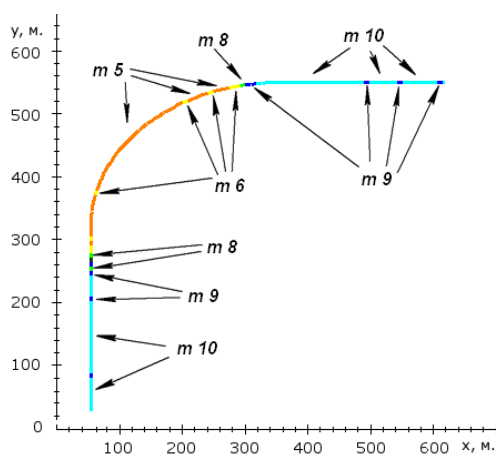


Рис 2. Траектория движения объекта и соответствующие ей значения  $m$

### заключение

Известные подходы к повышению точности сопровождения маневрирующих объектов базируются на явном или неявном обнаружении начала и окончания маневра и соответствующем изменении параметров алгоритма сопровождения. Траектория объекта описывается при этом несколькими моделями. Сущность сопровождения состоит в этом случае в анализе гипотез о возможных моделях движения объекта, а сами алгоритмы называются многомодельными [8].

Перспективной методикой построения алгоритма выбора оптимальной из множества моделей движения является использование современных интеллектуальных систем, в основу работы которых положена идея обучения. Обучающая выборка при этом должна нести информацию о параметрах алгоритма сопровождения, оптимальных для той или иной модели движения объекта. Настоящее исследование демонстрирует возможность формирования такой обучающей выборки для многомодельных алгоритмов сопровождения, основанных на реализации  $\alpha - \beta$  фильтра с различной степенью фильтрации.

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

1. Модеев Р.Н. СУДС – ядро информационной системы порта // Морские порты. - 2010. - №8. - С. 27-29.
2. ОАО Норфес [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://www.norfes.ru/>
3. Юдин Ю.И. Механизм предвидения в организационно-технических системах управления судовыми ключевыми операциями // Наука и техника транспорта. - 2007. - №1. - С. 74-81.
4. 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.
5. 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.
6. Кузьмин С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. - М.: Сов. радио, 1974. - 431 с.
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. Гриняк В.М., Трофимов М.В. Нечеткое сопровождение траектории движения судна // Журнал университета водных коммуникаций. - 2012. - №1. - С. 119-124.
9. Тихонов В. И., Теплинский И. С. Квазиоптимальное слежение за маневрирующими объектами // Радиотехника и электроника. - 1989. - Т.34. №4. - С. 792-797.
10. 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.