

УДК 519.68 : 15 : 681.5

Алгоритм мультимодельного сопровождения траектории движения судна с нечетким критерием детекции маневра

В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, сектор управления и навигации, г. Владивосток

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

Abstract. The target tracking problem for vessel traffic systems with 2D radars has been discussed. Conditions of small high-maneuver vessels tracking crash have been shown. The algorithm for robust track-while-scan tracking based on the Sugeno fuzzy logic maneuver detector has been considered.

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

Key words: vessel traffic system, target tracking, radar measurements, Sugeno fuzzy logic system, trace estimation

1. Введение

Современные береговые системы управления движением судов (СУДС) представляют собой наукоёмкие и сложные в техническом и организационном отношении предприятия (Модеев, 2010; ОАО Норфес, 2011; Юдин, 2007). 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 (Девятисильный и др., 2004; 2007):

- 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 *строба*, 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 строба; для описания линейных размеров этой области принят термин

"ширина строба". Главное назначение совокупности процедур обнаружения, захвата, стробирования и сопровождения – формализация измерительной информации, формирование измерений координат движущегося объекта на протяжении всей его траектории (Кузьмин, 1974).

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 (Гриняк, 2010; Юдин, 2007).

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 строба. Одним из путей разрешения этой проблемы является увеличение ширины строба. Вместе с тем, строб не может быть слишком большим – в него не должно "попадать" более одного объекта. Таким образом, максимальная ширина строба 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.

2. Модельные представления и постановка задачи

Рассмотрим следующую модель движения объекта

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

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; $q_x(k)$, $q_y(k)$ – случайные немоделируемые компоненты 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"

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

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 компонент движения; z_k – вектор измерений; r_k – вектор погрешностей измерений. Имея в виду (1) и полагая $f_x(k) = v_x(k)$, $f_y(k) = v_y(k)$, 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 x_k по измерениям z_k может быть представлена следующим уравнением

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

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 (Тихонов, Теплинский, 1989). В этом алгоритме матрица K имеет вид:

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

Сходимость алгоритма обеспечивается выполнением условия $0 < \alpha \leq 1, 0 < \beta \leq 1$. Коэффициенты α и β выбираются исходя из требований чувствительности алгоритма к немоделируемым манёврам судна q_k и ошибкам измерений r_k . Показано (Benedict, Bordner, 1962), что соотношение коэффициентов $\beta = \alpha^2 / (2 - \alpha)$ является оптимальным.

Примем, что коэффициенты α и β 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, соответственно, итераций), участвующих в оценке вектора состояния x_k итерационной процедурой (3), так что $k = \overline{1, J}$. При увеличении J коэффициенты α и β асимптотически уменьшаются, так что $\alpha \rightarrow 0, \beta \rightarrow 0$, 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 при этом задача одновременно решается при $J, J-1, J-2, \dots$ и, наконец, только при двух измерениях (минимально возможном их количестве), то можно говорить о реализации множества моделей решения задачи – мультимодельном сопровождении. При таком подходе в каждый 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 (5).

3. Метод решения задачи

Введем вектор $\delta z_{k+1} = z_{k+1} - H\Phi \hat{x}_k$, характеризующий невязку измерения при оценке вектора состояния уравнением (3). Пусть $\|\delta z\|_i^{(J)}$ – евклидова норма вектора невязки δz_{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, характеризующим качество сопровождения объекта алгоритмом (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 $L_i^{(j)} = \frac{\|\delta z\|_i^{(j)}}{\sigma}$, σ – величина, характеризующая средноквадратичное 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 термами "Хорошее" и "Плохое". Пусть термы имеют следующие функции принадлежности, определённые на универсальном множестве $u \in [0,3]$ (рис. 1):

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

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

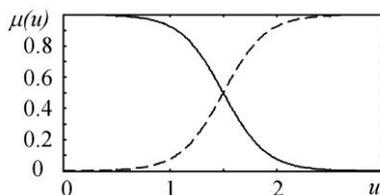


Рис. 1. Функции принадлежности термов "Хорошее" (сплошная линия) и "Плохое" (пунктир)

Из множества полученных оценок вектора состояния для решения задачи сопровождения подходят лишь те компоненты кортежа (5), для которых качество сопровождения характеризуется как "Хорошее". Выбор в пользу того или иного компонента предлагается делать следующим образом. Пусть переменные $Q_i^{(j)}$ обрабатываются машиной нечеткого вывода типа Сугено (Круглов и др., 2001), 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 таблице.

Таблица. Система правил машины нечеткого вывода Сугено

| № правила | $Q_i^{(2)}$ | $Q_i^{(3)}$ | $Q_i^{(4)}$ | ... | $Q_i^{(J-2)}$ | $Q_i^{(J-1)}$ | $Q_i^{(J)}$ | 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 типа 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). Настройка описанной системы состоит в задании максимального количества измерений J , параметров функций принадлежности a , c и величины σ , характеризующей погрешность измерений.

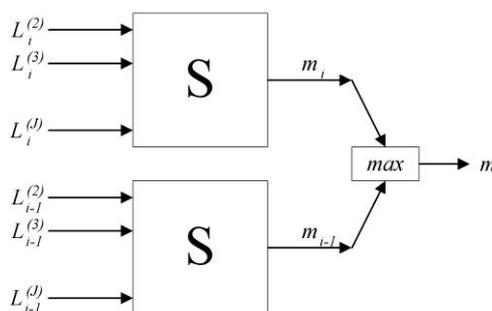


Рис. 2. Схема работы нечеткого алгоритма сопровождения траектории

4. 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, соответственно, $\Delta\varphi = 0.03^\circ$ и $\Delta r = 6$ м. 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).

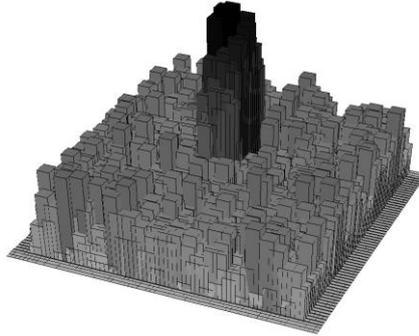


Рис. 3. Отраженный радиолокационный эхо-сигнал судна на фоне эхо-сигналов подстилающей поверхности (моря)

Величину 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 (Дорошко, 2001) (рис. 3). Соответственно и вероятностные характеристики ошибок измерений r_k можно априорно оценить только приблизительно, с точностью до порядка величин. Поэтому величину σ 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.

На рис. 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).

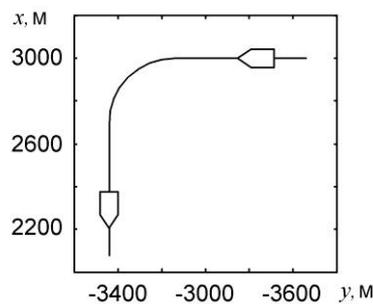


Рис. 4. Траектория движения судна

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 сопровождения траектории, δ – длина вектора погрешности оценивания положения судна по мере его движения (рис. 5а и 5б). В данном случае величина δ дает представление о ширине строба, необходимого для устойчивого сопровождения объекта. Так, при скорости судна 10 м/с погрешность оценки положения судна на прямолинейном участке

траектории (интервал времени [0, 45] сек и [90, 120] сек) составляет 10-12 м, а на участке маневра (интервал времени [45, 90] сек, заштрихованная область оси абсцисс) – не более 22 м. При скорости судна 20 м/с погрешность оценки положения судна на прямолинейном участке – 10-12 м, на участке маневрирования – не более 27 м. Такие значения лишь незначительно превышают характерные геометрические размеры маломерного судна; это означает, что строб с радиусом, например 30 м, дает возможность устойчиво сопровождать траекторию судна в насыщенном судопотоке даже при его интенсивном маневрировании.

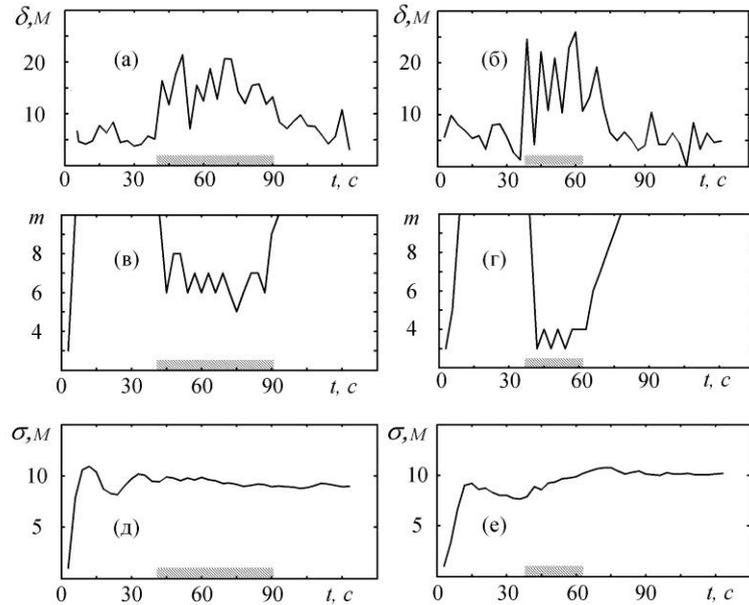


Рис. 5. Работа алгоритма сопровождения; штрихами по оси абсцисс показан участок маневрирования судна

Рис. 5в и 5г показывают значение величины m (m – номер вектора в кортеже (5), по сути – количество измерений в выбранном нечёткой системой для окончательной оценки $\alpha - \beta$ фильтре) по мере движения судна. Видно, что на прямолинейной траектории алгоритм устойчиво работает при максимальном $m = 10$, что соответствует минимальным значениям коэффициентов α и β , а при маневре (заштрихованный участок оси абсцисс) количество измерений, участвующих в оценке параметров движения судна, уменьшается до 5-6 (скорость движения судна – 10 м/с, рис. 5в) и 3-4 (скорость движения судна – 20 м/с, рис. 5г). Замечательное свойство алгоритма – быстрая реакция на изменение характера движения судна (начало и окончание маневрирования) – даже при высокой скорости движения изменение величины m с максимального до минимального (и наоборот) происходит не более чем за 10 сек (участок [65, 75] сек на рис. 5г). Это определяет исключительно высокую устойчивость сопровождения траектории по отношению к срыву.

Рис. 5д и 5е дают значение оценки величины σ , используемой при работе алгоритма. Видно, что по прошествии приблизительно 1 мин (что соответствует 20 измерениям) значение σ становится достаточно стабильным и корректно отражает среднеквадратичную погрешность измерений координат (в данном случае – около 10 м).

5. Заключение

При управлении движением судов для предотвращения столкновений формируется оценка экстраполированных координат каждого судна, на основе которых определяется возможность опасного сближения. Информационную базу для такой оценки дают специальные алгоритмы сопровождения траектории судна. Движение маломерных судов в насыщенном судопотоке делает актуальной проблему работы алгоритмов сопровождения на участках маневра судов, характеризующихся несоответствием между реальным движением судна и моделью движения, используемой в алгоритме. Точность сопровождения траектории при этом снижается, а формируемая информация о возможности опасного сближения судов становится ненадёжной.

Для разрешения неопределенности при сопровождении траектории маневрирующего судна в статье предлагается мультимодельный алгоритм сопровождения, основанный на реализации $\alpha - \beta$

фильтра с различным числом измерений, используемых для формирования оценки вектора состояния. Выбор из множества полученных оценок предлагается осуществлять с помощью аппарата нечеткой логики, ориентированного на неявное обнаружение маневра судна и оценку его характера. Одним из преимуществ предлагаемого подхода, как показывают результаты эксперимента, является устойчивость сопровождения траектории высокоманевренных судов стробом небольшой ширины.

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

Литература

- Benedict T.R., Bordner G.R.** Synthesis of an optimal set of radar track-while-scan smoothing equations. *IRE Trans*, on AC-1, July, p.27-32, 1962.
- Грияк В.М.** Идентификация опасных ситуаций в системах управления движением судов. *Территория новых возможностей. Вестник ВГУЭС*, № 4, с.197-207, 2010.
- Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Грияк В.М.** Система экспертных оценок состояния безопасности на морских акваториях. *Информационные технологии*, № 11, с.48-53, 2004.
- Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Лоскутов Н.В.** Информационные модели систем управления безопасностью движения в насыщенных судопотоках. *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*, № 1, с.114-128, 2007.
- Дорожко В.М.** Имитационная модель радиолокационного эхо-сигнала. *Дальневосточный математический журнал*, № 1, с.98-113, 2001.
- Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю.** Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М., Физматлит, 224 с., 2001.
- Кузьмин С.З.** Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., Сов. радио, 431 с., 1974.
- Модеев Р.Н.** СУДС – ядро информационной системы порта. *Морские порты*, № 8, с.27-29, 2010. ОАО Норфес. 2011. URL: <http://www.norfes.ru/>.
- Тихонов В.И., Теплинский И.С.** Квазиоптимальное слежение за маневрирующими объектами. *Радиотехника и электроника*, т.34, № 4, с.792-797, 1989.
- Юдин Ю.И.** Механизм предвидения в организационно-технических системах управления судовыми ключевыми операциями. *Наука и техника транспорта*, № 1, с.74-81, 2007.