

В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный

Классификация движущихся объектов типа «надводный-воздушный» в лингвистических переменных*

Рассматривается проблема идентификации воздушных объектов современными СУДС. В основе предлагаемого подхода - оценка высоты наблюдаемого объекта по измерениям дальности и азимута. В дальнейшем полученные оценки обрабатываются нечеткой системой типа Мамдани, определяющей степень принадлежности объекта к классу воздушных. Описана конфигурация нечеткой системы, даются рекомендации по её обучению. С помощью компьютерного моделирования показана конструктивность предлагаемого подхода для типичных ситуаций.

Ключевые слова: управление движением судов, воздушный объект, радар, измерение, высота объекта, нечеткая система типа Мамдани

ВВЕДЕНИЕ

Задача заблаговременного распознавания опасно сближающихся судов (одна из центральных функций системы управления движением судов) оформилась в настоящее время как особый раздел науки об управлении [1, 2]. Методологической основой распознавания опасного сближения судов является оценка параметров траектории движения каждого судна (координат, скоростей и т.д.) и их экстраполяция. Если суда идентифицированы как опасно сближающиеся, система управления движением генерирует тревожный сигнал и рекомендации по изменению траектории движения.

Если в зоне ответственности системы управления движением судов (СУДС) наряду с надводными объектами присутствуют маловысотные низкоскоростные воздушные (вертолеты), то это может в корне исказить представление о навигационной обстановке. Суть проблемы состоит в том, что ошибочное заключение судоводителя или оператора СУДС о воздушной цели как о морской (когда их скорости движения сравнимы), способно привести к ложной тревоге и ошибочным управленческим решениям. Проблема частично решается применением автоматической идентификационной системы - АИС на воздушном объекте (информация АИС позволяет, в том числе, однозначно идентифицировать тип цели). Вместе с тем, транспондерами АИС оснащаются далеко не все воздушные объекты, до-

пускающие полет над акваторией, что требует селекции воздушных объектов расширением навигационных функций систем, образуемых на основе двухкоординатных радаров.

В настоящей работе исследуется возможность создания на базе двухкоординатных радаров информационной системы, обеспечивающей достоверную классификацию объектов типа «надводный-воздушный» с использованием идей, положенных в основу обучаемых нечетких систем.

МОДЕЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема трехкоординатного наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями неоднократно привлекала внимание исследователей [3-8]. Была показана принципиальная возможность (хотя и с ограниченным эффектом) решения трехкоординатной задачи при использовании одного двухкоординатного радара; продемонстрирован результат при переходе к многопозиционному наблюдению, когда используется система нескольких двухкоординатных радаров. В ряде работ [6, 8] доказана перспективность оценки координат объектов в сферической системе φ, λ, R – соответственно, географические широта, долгота и расстояние от центра Земли до объекта (с учетом пространственной локальности рассматриваемой задачи за модель поверхности Земли принимается сфера).

Особенностью внешнего наблюдения, осуществляемого с помощью радаров, является отсутствие непосредственного измерения сил и моментов, обуславливающих движение объекта. Поэтому при

* Работа выполнена в рамках Государственного задания высшим учебным заведениям в части проведения научно-исследовательских работ, проект № 7.2104.2011

описании эволюции координат наблюдаемых объектов традиционно обращаются к кинематическим моделям следующего полиномиального вида:

$$\begin{aligned} \Phi_{k+1} &= \Phi_k + \sum_{i=1}^{n_\phi} a_i^\phi(k) T^i, \\ \lambda_{k+1} &= \lambda_k + \sum_{i=1}^{n_\lambda} a_i^\lambda(k) T^i, \\ R_{k+1} &= R_k + \sum_{i=1}^{n_R} a_i^R(k) T^i, \end{aligned} \quad (1)$$

$$k = \overline{1, m},$$

где Φ_k, λ_k, R_k – значения соответствующих координат объекта в момент времени t_k ; n_ϕ, n_λ, n_R – максимальные значения степеней соответствующих полиномов; $a_i^\phi(k), a_i^\lambda(k), a_i^R(k)$ – коэффициенты полиномов, отождествляемые со скоростями изменения соответствующих координат и функциями от их более старших производных; $T = t_{k+1} - t_k$; $t_k \in [t_1, t_m]$.

Информационная ситуация, обеспечиваемая сетью из L радаров, описывается моделью вида:

$$z_k^{(j)} = \begin{bmatrix} r^{(j)}(k) \\ \psi^{(j)}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_r^{(j)}(k) \\ \xi_\psi^{(j)}(k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $z_k^{(j)}$ – вектор k -го измерения j -й станцией; $r^{(j)}(k)$ – дальность от объекта до j -й станции в момент времени $t_k^{(j)}$ (время k -го измерения j -й станцией); $\psi^{(j)}(k)$ – азимут объекта по отношению к j -й станции в момент времени $t_k^{(j)}$; $t_{k+1}^{(j)} - t_k^{(j)} = T^{(j)}$; $T^{(j)}$ – период вращения j -й станции; $\xi_r^{(j)}(k), \xi_\psi^{(j)}(k)$ – инструментальные измерительные погрешности, причём $M[\xi_r^{(j)}(k)] = 0, M[\xi_r^{(j)}(k), \xi_r^{(i)}(m)] = D_r^{(j)} \delta_{ji} \delta_{km}, M[\xi_\psi^{(j)}(k)] = 0, M[\xi_\psi^{(j)}(k), \xi_\psi^{(i)}(m)] = D_\psi^{(j)} \delta_{ji} \delta_{km}; j = \overline{1, L}; M[*]$ – оператор математического ожидания; δ_{ij} – символ Кронекера.

В соответствии с указанными модельными представлениями может быть поставлена обратная траекторная задача, описываемая уравнениями (1) и (2), ее цель – определение u -мерного вектора

$$s_k = (\phi_k, a_1^\phi(k), \dots, a_{n_\phi}^\phi(k), \lambda_k, a_1^\lambda(k), \dots, a_{n_\lambda}^\lambda(k), R_k,$$

$$a_1^R(k), \dots, a_{n_R}^R(k))^T$$

по измерениям $z_k^{(j)}, j = \overline{1, L}, u = \dim s_k$.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Общим методом решения таких обратных задач является их линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о движении объекта. Допуская наличие опорного решения, будем говорить о сведении исходной задачи к задаче «в малом» с искомым вектором

$$\delta s_k = (\delta\phi_k, \delta a_1^\phi(k), \dots, \delta a_{n_\phi}^\phi(k), \delta\lambda_k, \delta a_1^\lambda(k), \dots, \delta a_{n_\lambda}^\lambda(k), \delta R_k, \delta a_1^R(k), \dots, \delta a_{n_R}^R(k))^T,$$

где δs_k – вектор погрешностей априорных представлений. Линеаризация исходных задач (1), (2) приводит её к следующему виду «состояние-измерение»:

$$\begin{aligned} \delta s_{k+1} &= A_k \delta s_k + q_k, \\ \delta z_k^{(j)} &= H_k \delta s_k + \xi_k^{(j)}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$j = \overline{1, L},$$

где q_k – вектор не моделируемых параметров движения, A, H – матричные коэффициенты (матрицы частных производных) с размерностью, соответственно, $(u \times u)$ и $(2 \times u)$. Преобразование уравнений (3) к конечномерному виду, характерному для задач метода наименьших квадратов, приводит исходную задачу к модели

$$\delta Z = \tilde{H} \delta s_i + \tilde{q}, \quad (4)$$

где δZ – полный вектор измерений на интервале наблюдения; δs_i – вектор погрешностей априорных представлений в момент времени t_i ; \tilde{q} – вектор приведённых погрешностей измерений; \tilde{H} – матричный коэффициент размерности $N \times \dim s_i$, являющийся композицией матриц A и H ; N – общее число обрабатываемых измерений (от всех станций).

Несмотря на то, что при $a_1^\phi(i)$ и $a_1^\lambda(k)$, не равных одновременно нулю, система (4) не вырождена уже для одного радара ($L = 1$), а при наличии в системе нескольких радаров ($L > 1$) задача, в принципе, разрешима при любых возможных траекториях движения наблюдаемого объекта [5]. Для обеспечения практической разрешимости задачи необходимо ограничить размерность задачи (1), (2) так, чтобы движение объекта описывалось полиномами первой степени для угловых компонент и нулевой степенью для радиальной (т. е. $n_\phi = 1, n_\lambda = 1, n_R = 0$,

$s_i = (\phi_i, a_1^\phi(i), \lambda_i, a_1^\lambda(i), R_i)^T$). Это соответствует движению объектов на постоянной высоте без маневрирования на интервале наблюдения.

Характерным свойством рассматриваемой задачи (1), (2) является нерегулярность оценок радиальной координаты (т.е. высоты) маловысотных удалённых объектов, что связано с плохой обусловленностью системы (4), исходной нелинейностью задачи и конечной точностью измерений [6, 8]. Эта особенность задачи продемонстрирована на рис. 1, где приведена оценка высоты

надводного объекта (рис. 1а) и воздушных объектов, движущихся на высоте 100 м (рис. 1б) и 200 м (рис. 1в) – для случая двух РЛС, измеряющих дальность с погрешностью ± 5 м, и азимут с погрешностью $\pm 0.1^\circ$. Видно, что начиная с некоторого расстояния от системы радаров воздушный объект становится (по оценке высоты) неотличимым от морского: в данном случае это 5 км для объекта с высотой 100 м и 9 км – для объекта с высотой 200 м. Сами оценки высоты носят «изрезанный» характер со случайными выбросами. Такая картина является побудительным мотивом наряду с оцениванием собственно высоты объекта определять дополнительно ещё и «высотный класс» объекта, т. е. диапазон высот, которому принадлежит траектория объекта. В настоящей работе возможные диапазоны высот ограничены понятиями «морской» и «воздушный». При таком взгляде на проблему оказывается продуктивной идея формализации задачи в понятиях систем нечеткой логики.

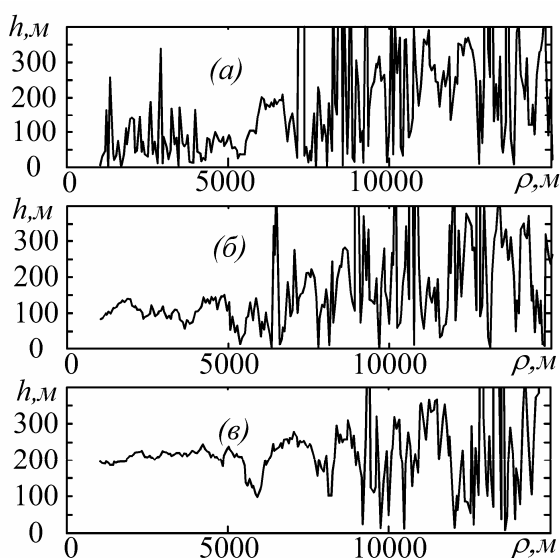


Рис. 1. Оценка высоты объекта по мере удаления от радаров.

Здесь ρ - расстояние от системы радаров

Пусть $\hat{h}_i = \hat{R}_i - R_3$ – оценка высоты объекта над уровнем моря (\hat{R}_i – оценка радиальной компоненты вектора s_i , R_3 – радиус Земли на уровне моря). С учетом особенности задачи будем считать, что основными информативными признаками, дающими представление о «высотном классе» объекта, являются оценка его высоты и сравнительный характер (степень «изрезанности», «нерегулярности») оценок высоты в различные моменты времени t_i . Введем лингвистическую переменную P_h «оценка высоты объекта» с термами «большая» и «малая» и функциями принадлежности типа «дополнение»:

$$\mu_{\text{малая}}(h) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_h(h - c_h))},$$

$$\mu_{\text{большая}}(h) = \frac{1}{1 + \exp(-a_h(h - c_h))}.$$

Пусть $\Delta_i = 2 \left| \hat{h}_i - \hat{h}_{i-1} \right| / \left| \hat{h}_i + \hat{h}_{i-1} \right|$ – относительная разность между соседними оценками высоты. Введем лингвистическую переменную P_Δ «разность соседних оценок высоты объекта» с термами «большая» и «малая» и функциями принадлежности термов типа «дополнение»:

$$\lambda_{\text{малая}}(\Delta) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_\Delta(\Delta - c_\Delta))},$$

$$\lambda_{\text{большая}}(\Delta) = \frac{1}{1 + \exp(-a_\Delta(\Delta - c_\Delta))}.$$

Пусть u_i – степень принадлежности наблюдаемого объекта к диапазону высот «воздушный» в момент времени t_i . Введем лингвистическую переменную P_u «высотный диапазон объекта» с термами «надводный» и «воздушный» и функциями принадлежности типа «дополнение»:

$$\nu_{\text{надводный}}(u) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_u(P - c_u))},$$

$$\nu_{\text{воздушный}}(u) = \frac{1}{1 + \exp(-a_u(P - c_u))}.$$

Величины \hat{h}_i и Δ_i (вход) обрабатываются нечеткой системой типа Мамдани M [9], показанной на рис. 2, на выходе которой формируется числовое значение u_i – степень принадлежности наблюдаемого объекта к диапазону высот «воздушный» в момент времени t_i . Машина нечеткого вывода работает согласно системе правил, представленной в таблице.

Система правил машины нечеткого вывода типа Мамдани

№	P_h	P_Δ	P_u
1	большая	большая	надводный
2	большая	малая	воздушный
3	малая	большая	надводный
4	малая	малая	надводный

Согласно этой системе правил, решение о том, что объект воздушный, принимается когда оценка высоты объекта достаточно велика, чтобы выделить его из морских и при этом она регулярна – относительная разность между соседними оценками незначительна. В противном случае принимается решение о том, что объект является надводным. Универсальное множество величины \hat{h}_i целесообразно ограничить диапазоном [0, 100] м; если $\hat{h}_i > 100$, то этот вход принимается равным 100. Универсальное множество величины Δ_i ограничивается диапазоном [0, 1], если $\Delta_i > 1$, то этот вход принимается равным 1. Универсальное множество

выхода системы u_i есть отрезок $[0, 1]$, причем $u_i = 0$ для однозначно надводных объектов и $u_i = 1$ для однозначно воздушных объектов.

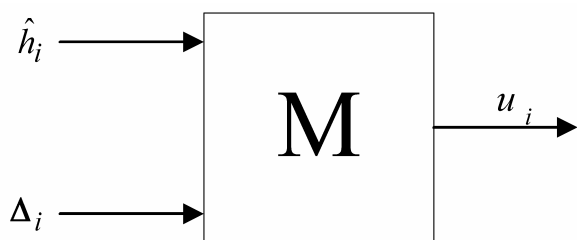


Рис. 2. Схема нечеткой системы, определяющей принадлежность объекта к диапазону высот «воздушный»

Настройка описанной системы состоит в задании количества измерений m от каждой радиолокационной станции (РЛС) и параметров функций принадлежности $a_h, c_h, a_\Delta, c_\Delta, a_u, c_u$.

ОБУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ

Обучение системы (т. е. настройка параметров функций принадлежности $a_h, c_h, a_\Delta, c_\Delta, a_u, c_u$) может быть проведено с применением трёх различных стратегий.

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 a_u, c_u назначаются экспертом, а коэффициенты $a_h, c_h, a_\Delta, c_\Delta$ определяются настройкой системы на обучающей выборке.

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

Обучающая выборка формируется следующим образом. Моделируется решение задачи (1), (2) при движении объекта на различных высотах, в том числе и при движении надводного объекта. В результате получаются оценки высоты объекта, подобные изображенному на рис. 1, формирующие входные данные обучающей выборки. Соответствующие им выходные данные обучающей выборки формируются экспертом: если характер оценки высоты объекта дает возможность отличить его от надводного, считается, что система выдаёт значение $u_i = 1$, и значение $u_i = 0$ – в противном случае. На рис. 3 показан пример формирования фрагмента такой обучающей выборки.

Здесь 3а – оценка высоты наблюдаемого объекта по мере его удаления от системы радаров (движение объекта моделируется на высоте 200 м), 3б – относительная разность соседних оценок высоты, 3в – решение эксперта о возможности выделить

объект как воздушный: оценки высоты позволяют устойчиво сделать это до дальности, приблизительно, 10 км ($u_i = 1$), далее следует короткая зона, где объект не может быть выделен как воздушный, и поэтому отнесен к надводным ($u_i = 0$), затем до дальности, приблизительно, 11.5 км объект снова может быть отнесен к воздушным ($u_i = 1$), после чего следует сплошная зона, где он классифицируется как надводный ($u_i = 0$).

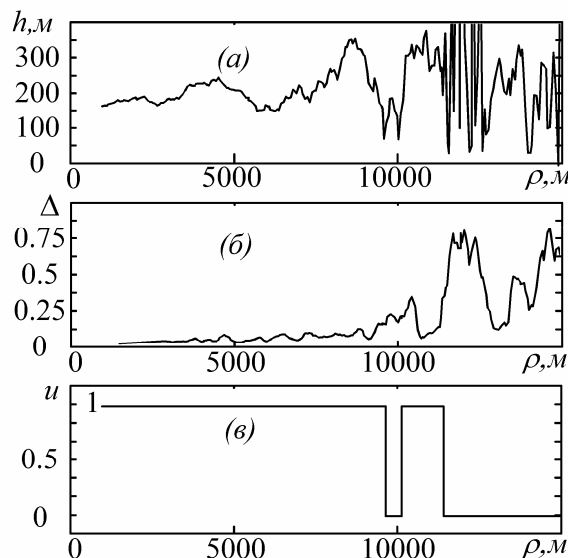


Рис. 3. Пример формирования обучающей выборки из оценок высоты, относительной разности соседних оценок высоты (вход) и степени принадлежности объекта к диапазону высот «воздушный» (выход).

Накапливая данные для различных высот движения объекта и множества возможных траекторий, формируют общую обучающую выборку, на базе которой и обучают нечеткую систему типа Мамдани (рис. 2) в рамках стратегии 2 или стратегии 3, пользуясь известными методами обучения систем такого типа [9, 10].

Результаты численного моделирования

При моделировании задачи было принято, что информационной базой СУДС являются два радара кругового обзора (например, типа Raytheon), находящихся на расстоянии 5 км друг от друга, с периодом обращения 3с и погрешностями измерений угла и дальности, соответственно, $\xi_{\psi}^{(j)}(k) \in [-0.1^\circ, 0.1^\circ]$, $\xi_r^{(j)}(k) \in [-5м, 5м]$. Количество измерений m от каждой станции было принято равным $m = 10$ и $m = 20$ (т. е. измерения набираются в течение 30 секунд и одной минуты).

Обучение системы проводилось в рамках стратегии 3, объём обучающей выборки составил около 10 000 значений «вход-выход», полученных при моделировании движения объекта по различным траекториям.

На рис. 4 показана траектория движения воздушного объекта, моделируемая для демонстрации решения задачи распознавания воздушных объектов с помощью предварительно обученной нечеткой системы типа Мамдани (см. рис. 2). Здесь I и II – радиолокационные станции, III – траектория объекта. Объект движется издалека по прямой со скоростью 20 м/с, приближаясь к РЛС; ρ – расстояние от объекта до линии, соединяющей радиолокационные станции.

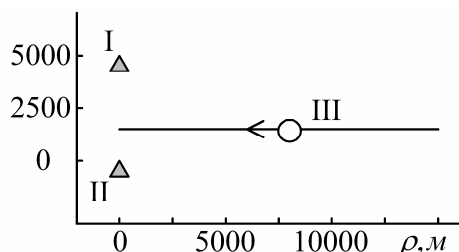


Рис. 4. Моделируемая конфигурация системы двух радаров и траектория движения объекта

На рис. 5 показаны результаты решения задачи оценки высоты объекта и оценки нечеткой системой его высотного диапазона. Здесь ρ – расстояние от объекта до линии, соединяющей радиолокационные станции, h – высота объекта, u – степень принадлежности объекта к диапазону высот «воздушный», P_u – высотный диапазон объекта. Задача моделировалась для объекта, движущегося на высоте 100 м с количеством измерений $m = 20$ (рис. 5а, 5в и 5д, левая колонка) и $m = 10$ (рис. 5б, 5г и 5е, правая колонка). Из рисунка видно, что, например, уверенное

выделение воздушного объекта, движущегося на высоте 100 м, возможно до дальности ≈ 7000 м при $m = 20$ (рис. 5д) и до дальности ≈ 3000 м при $m = 10$ (рис. 5е). Такие дальности (по сути – границы применимости метода) вполне соответствуют размерам зон ответственности в акваториях морских портов, что указывает на пригодность предлагаемого метода селекции воздушных объектов для судоводительской практики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье обозначена проблема генерации ложных тревог при управлении коллективным движением судов, связанная с присутствием над акваторией воздушных объектов (вертолетов). Для корректной обработки системой управления движением судов таких объектов необходимо их идентифицировать. Алгоритм классификации объектов типа «надводный-воздушный» основан на вычислении высоты объекта по результатам измерений его дальности и азимута системой двухкоординатных радиолокационных станций и обработке полученных данных нечеткой системой типа Мамдани, предварительно обученной на моделируемых данных. Предлагаемый алгоритм позволяет принять решение о принадлежности объекта к классу надводных или воздушных объектов. В статье продемонстрированы границы применимости предлагаемой методики. В целом на основании анализа представленных данных можно сделать вывод о конструктивной разрешимости рассматриваемой задачи классификации. Результаты работы ориентированы на расширение навигационных функций современных систем управления движением судов.

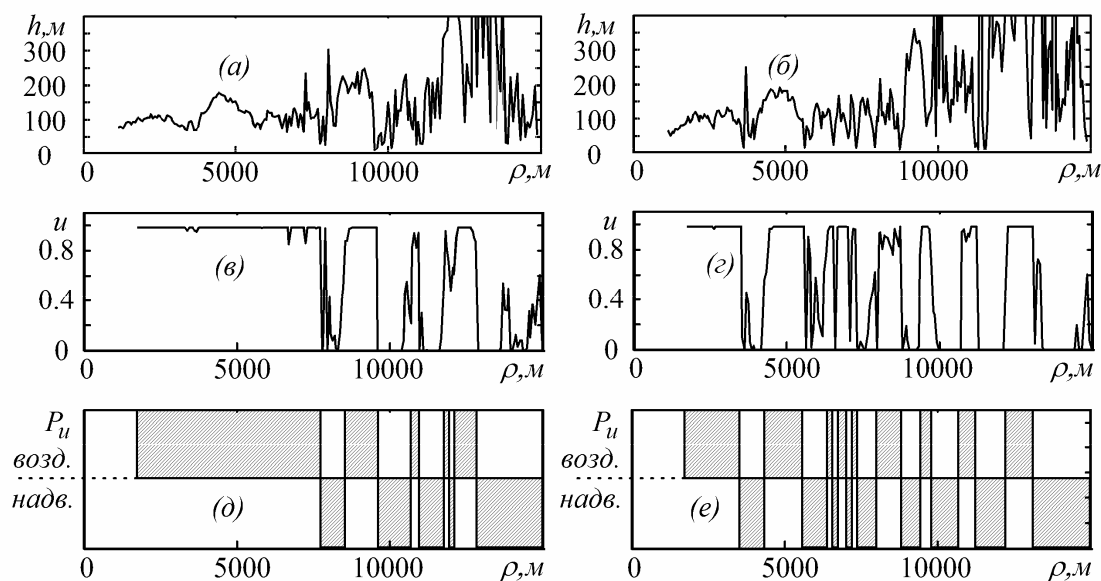


Рис. 5. Результат решения задачи

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters // The J. of Navigation. – 2009. – Vol.62, № 2. – P. 455-476.
2. Астреин В.В. Системы предупреждения столкновения судов, тенденции развития (к 40-летию МППСС-72) // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2012. – №1. – С. 7-17.
3. Berle F.J. Multy radar tracking and multy sensor tracking in air defense systems // Electronic Technologies. – 1984. – Vol.28, № 4.
4. Nabaa N., Bishop R.H. Estimate Fusion for 2D Search Sensors // Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, August 1995, Monterey, CA.
5. Гриняк В.М. Исследование пространственной задачи навигации в условиях неполной измерительной информации // Дальневосточный математический журнал. – 2000. – Т.1, № 1. – С. 93-101.
6. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Нейроподобные алгоритмы высотной классификации воздушных объектов // Информационные технологии. – 2001. – № 12. – С. 45-51.
7. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Способ распознавания удалённых воздушных объектов: Патент №2206104 // Б.И. – 2003. – №16.
8. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Идентификация воздушных объектов в системах управления движением судов // Транспорт: наука, техника, управление. – 2012. – № 8. – С. 38-40.
9. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия телеком, 2007. – 288 с.
10. Nauk D., Klawonn F., Kruse R. Foundations of Neuro-Fuzzy Systems. – John Wiley & Sons, 1997. – 305 с.

Материал поступил в редакцию 02.04.13.

Сведения об авторах

ГРИНЯК Виктор Михайлович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой Информационных систем и прикладной информатики Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, кафедра.
E-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru

ДЕВЯТИСИЛЬНЫЙ Александр Сергеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток.
E-mail: devyatis@iacp.dvo.ru