

of the engineering and fighting efficiency, maintenance and service properties, statistical acceptance quality control are put into practice by every test-specimen. Processing and treatment of the evaluation results demand application of special instruments. Let us choose such an instrument as the method of a small sample. The use of this method makes it possible to obtain evaluations of the power density function. Experimental data are represented by the following distributions: distribution of the fighting efficiency, distribution of maintenance and service properties. Evaluation of the distribution used under these conditions receive a numerical value (quantity) of the fighting efficiency and operating quality of the test-specimen of the military equipment.

Keywords: methodology principle, test-process, military equipment, limited resources, small sample, statistical analysis, effectiveness, quality

For citation:

Shibanov G. P. Methodological Approach to Testing of the Arms and Military Equipment in the Conditions of Limited Resources, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 122–127.

DOI: 10.17587/mau.18.122-127

References

1. **Gaskarov D. V., Shapovalov V. I.** *Malaya vyborka* (Small sample), Moscow, Statistics, 1976, 248 p. (in Russian).
2. **Voinov K. N.** *Prognozirovanie nadezhnosti mekhanicheskikh sistem* (Forecast the reliability of mechanical systems), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 208 p. (in Russian).
3. **Metodika statisticheskoi obrabotki informatsii o nadezhnosti tekhnicheskikh izdelii na EVM** (Procedure of statistical working of information about the reliability of engineering article on electronic computer), Moscow, Publication of standards, 1974, 55 p. (in Russian).
4. **Ventcel E. S.** *Teoriya veroyatnostei* (Theory of probability), Moscow, Nauka, Fismatgis, 1974, 564 p. (in Russian).
5. **Pugachev V. S.** *Teoriya veroyatnostei i matematicheskaya statistika* (Theory of probability and mathematical statistics), Moscow, Nauka, Fismatgis, 1979, 496 p. (in Russian).

6. **Korolij V. S., Portenko N. I., Skorohod A. V., Turbin A. F.** *Spravochnik po teorii veroyatnostei i matematicheskoi statistike* (Reference book by theory of probability and mathematical statistics), Moscow, Nauka, Fismatgis, 1985, 640 p. (in Russian).

7. **Shibanov G. P., Adgamov R. I., Dmitriev S. V., Kojevnikov J. V.** *Avtomatizatsiya ispytaniy i kontrolya aviatsionnykh GTD* (Automatization of testing and control aviation gas-turbine engines), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 280 p. (in Russian).

8. **Zajigayev L. S., Kishij A. A., Romanikov J. I.** *Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov fizicheskogo eksperimenta* (Methods of planning and Processing of results physical experiment), Moscow, Atomizdat, 1978, 232 p. (in Russian).

9. **Adgamov R. I., Borovik V. O., Dmitriev S. V., Kojevnikov J. V., Shibanov G. P.** *Obrabotka i analiz informatsii pri avtomatizirovannykh ispytaniyakh gazoturbinnnykh dvigatelei* (Processing and analysis information under automatization testing of gas-turbine engine), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 216 p. (in Russian).

10. **Adgamov R. I., Dmitriev S. V., Kojevnikov J. V., Hairullin A. H., Shibanov G. H.** *Avtomatizirovannyye ispytaniya v aviastroenii* (Automatization testing at aircraft industry), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 426 p. (in Russian).

УДК 519.68:15:681.5

DOI: 10.17587/mau.18.127-134

В. М. Гриняк, канд. техн. наук, доц., victor.grinyak@gmail.com,

Дальневосточный федеральный университет,

О. А. Горошко, канд. физ.-мат. наук, доц.,

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса,

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., devyatis@iacp.dvo.ru,

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Система экспертного оценивания и визуализации параметров траектории безопасного движения судна¹

Рассмотрена модель информационной системы, оценивающей возможность опасного сближения морских судов и обеспечивающей поддержку принятия решений по предотвращению опасного сближения. Предложен метод визуализации информации о навигационной обстановке на акватории, сочетающий в себе классические подходы построения "области маневра" и многоуровневую оценку риска опасного сближения судов. Метод позволяет наглядно представлять информацию об опасных и без-опасных параметрах движения судов на рабочем месте оператора береговой системы управления движением судов и судово-дителя, что соответствует современной тенденции развития в направлении углубления интеграции береговых и судовых сис-тем (е-навигация). Работа сопровождается результатами вычислительного эксперимента и натурных испытаний.

Ключевые слова: управление движением судов, опасное сближение, траектория движения, маневрирование судна, нечеткая система

Введение

Навигационная безопасность коллективного дви-жения судов является актуальной проблемой экс-плуатации водных транспортных путей [1]. В ограни-ченных водах ее обеспечение возложено на особый

класс технических средств — береговые системы управления движением судов (СУДС). Их задачи реализуются с использованием измерительной ин-формации, доставляемой радарными и спутниковы-ми средствами траекторных измерений — транс-пондерами Автоматической идентификационной системы (АИС) [2, 3].

¹ Работа поддержана грантом РФФИ, проект 15-08-00234.

Движение морского транспорта имеет свою особую отраслевую специфику. В судоводительской практике считается, что каждая навигационная ситуация является по-своему уникальной и зависящей от множества факторов: Международных правил предупреждения столкновений судов (МППСС), правил судоходства на конкретной акватории, состояния водной среды (течение, волнение), погодных условий, характера движения других судов, находящихся на акватории и т.д. [1]. Кроме того, динамика судна как объекта, движущегося в жидкой среде, исключительно сложна. Поэтому береговые СУДС не являются системами управления судном в классическом понимании. Задача СУДС — общая диспетчеризация движения путем выдачи оператором СУДС указаний (например, о снижении скорости или изменении полосы движения), а способ выполнения этих указаний выбирает капитан судна. Другими словами, СУДС является системой поддержки принятия решений [4].

В настоящее время в организационном плане развитие береговых СУДС идет по пути интеграции с судовыми системами и береговыми службами; концепция такой интеграции получила название "е-навигация" [5]. С точки зрения технических аспектов е-навигации СУДС должны обеспечивать механизмы координации движения судов и работы соответствующих береговых служб, в том числе за счет представления комплексных данных и обмена ими в форматах, которые будут наиболее удобны и понятны для операторов береговых служб, обеспечивающих безопасность движения.

Одним из перспективных подходов к представлению навигационной информации в обсуждаемом контексте являются диаграммы типа "скорость—курс" [6, 7]. Они традиционно используются бортовыми навигационными средствами для визуализации данных об опасных и безопасных скоростях и курсах движения с точки зрения задачи "судно—судно".

Диаграммы типа "скорость—курс", как правило, оперируют двухуровневой оценкой опасности типа "опасный/безопасный". В работах [8—10] и др. авторами исследовались модели экспертного оценивания степени опасности ситуации в задаче "судно—судно" с выделением множества уровней опасности типа "очень опасный/опасный/почти безопасный/" и т.п. Комплексирование традиционных диаграмм типа "скорость—курс" с многоуровневыми моделями оценки опасности ситуации представляет исследовательский и прикладной интерес.

Известна работа [11], в которой предлагается наиболее близкий из известных аналог такого подхода; градации уровней опасности в нем обусловлены допустимым минимальным расстоянием между судами и правилами судоходства. С учетом результатов, полученных авторами ранее, в настоящей работе предлагается альтернативный способ построения многоуровневых диаграмм типа "скорость—курс" путем разделения уровней опасности

на основе траекторных свойств движения судов. Это отвечает особенностям внешнего наблюдения береговой СУДС и характеру задач, возложенных на нее. Рассматриваемая модель системы оценки степени опасности параметров движения судна позволяет обеспечить поддержку принятия согласованных решений операторами СУДС и судоводителями.

Основные модельные представления

При моделировании навигационной безопасности коллективного движения будем использовать традиционный подход — построение модели в задаче "судно—судно" для каждой пары судов; это является обычной практикой [12].

Примем, что в качестве информационной базы СУДС используется приемопередатчик автоматической идентификационной системы (АИС), передающий информацию GPS/ГЛОНАСС; измерение траектории каждого судна включает в себя его координаты и компоненты вектора скорости.

Рассмотрим два судна с координатами $x^{(1)}$, $y^{(1)}$ и $x^{(2)}$, $y^{(2)}$ и скоростями $v_x^{(1)}$, $v_y^{(1)}$ и $v_x^{(2)}$, $v_y^{(2)}$. Будем описывать их коллективное движение набором величин $s = (r_x, r_y, v_x, v_y)$ — вектором состояния коллективного движения двух судов, где $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}$, $r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$ — компоненты вектора относительного положения судов r ; $v_x = v_x^{(1)} - v_x^{(2)}$, $v_y = v_y^{(1)} - v_y^{(2)}$ — компоненты вектора относительной скорости движения судов v (рис. 1).

Главным условием безопасного движения является недопущение опасного сближения судов. Это обеспечивается соблюдением некоей "зоны безопасности" вокруг судна, называемой также "корабельным доменом" [1]. В настоящей работе рассматривается корабельный домен статического типа, жестко привязанный к судну с номером n и интерпретируемый окружностью заданного радиуса R_n . Совокупность величин r_x , r_y , v_x , v_y свидетельствует о потенциально опасном движении двух судов в

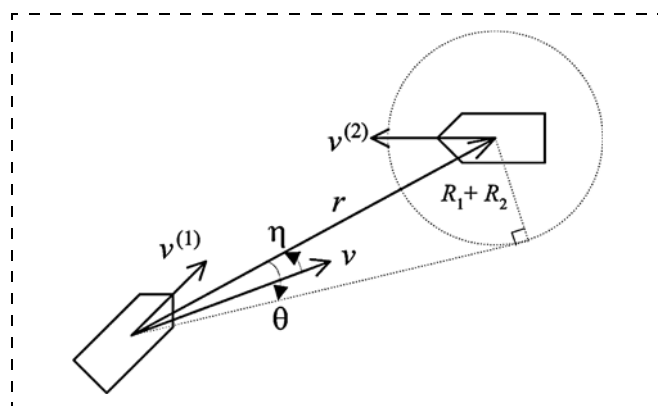


Рис. 1. Модель относительного движения пары "судно—судно"

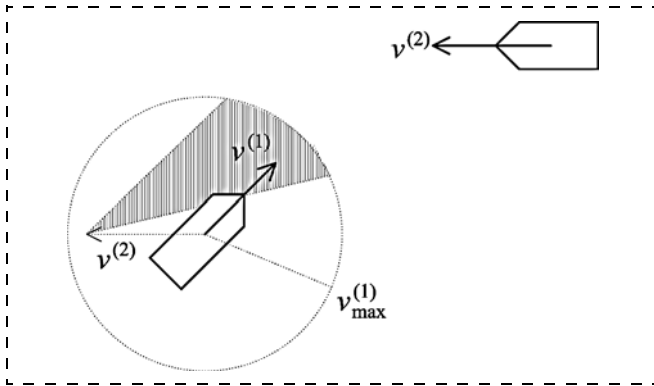


Рис. 2. Принцип построения диаграммы типа "скорость—курс". Окружностью радиуса $v_{\max}^{(1)}$ показаны максимальные возможные значения скорости судна 1

случае выполнения следующих неформальных условий [13]:

- направление вектора скорости относительного движения судов таково, что вектор v находится внутри сектора, определяемого размером корабельного домена и расстоянием между судами;
- суда движутся прямолинейно и равномерно;
- время, оставшееся до максимального сближения судов, ниже допустимого.

Будем считать судно 1 управляемым судном. Переходя при определении потенциально опасного движения от относительного движения судов к абсолютному, будем иметь множество значений вектора скорости первого судна $v^{(1)}$, соответствующих "опасным" значениям вектора v (заштрихованная область, рис. 2). Сектор, соответствующий потенциально опасным значениям скорости и курса судна 1, получается путем параллельного переноса сектора "опасных" значений вектора v на вектор $v^{(2)}$. Такая визуализация помогает оператору СУДС и судоводителю не только распознать потенциально опасную ситуацию, но и оценить возможности по предотвращению опасного сближения судов. Например, в данном случае следует либо уменьшить скорость судна 1, либо изменить его курс таким образом, чтобы вектор $v^{(1)}$ вышел из заштрихованной зоны.

Введем следующие величины (см. рис. 1):

$|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ — расстояние между судами; $|v| =$

$= \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ — скорость относительного движения

судов; $\theta = \arcsin \frac{R_1 + R_2}{|r|}$ — угол, определяемый расстоянием между судами и размерами их доменов;

$\eta = \arccos \frac{r_x v_x + r_y v_y}{|r||v|}$ — угол между векторами r и v ;

$\frac{d|r|}{dt} = -\frac{r_x v_x + r_y v_y}{|r|}$ — скорость изменения расстояния между судами; D — функция-детектор манев-

ра, причем если $D > 0$, то наблюдаемое судно маневрирует, если $D < 0$ — судно движется прямолинейно и равномерно (функция D может быть построена множеством известных способов, см.,

например, работу [8]); $T = -\frac{|r|^2}{r_x v_x + r_y v_y}$ — прибли-

женное время, оставшееся до максимального сближения судов (необходимо доопределить функцию для случая относительно неподвижных судов).

Потенциально опасное сближение двух судов может быть формализовано следующим образом:

$$\eta < \theta; \quad (1)$$

$$D < 0; \quad (2)$$

$$0 < T < T^*, \quad (3)$$

где T^* — пороговое значение. Условия (1) и (2) формализуют опасную ситуацию при равномерном и прямолинейном движении судов; условие (3) отбирает из общего массива лишь те суда, время до сближения которых меньше порогового. В случае маневренного движения судов (т.е. при $D > 0$) примем, что маневрирование судна свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией [14]. Поэтому при внешнем наблюдении маневрирующие объекты характеризуются невысоким вербальным уровнем опасности.

С учетом сказанного можно сформулировать систему правил для оценки степени опасности навигационной ситуации u в зависимости от истинности условия (1)–(3), представленную в табл. 1.

Степень опасности 0 (минимальная) соответствует безопасной ситуации; степень опасности 1 (средняя) — суда могут опасно сблизиться, но при этом они маневрируют, т.е. судоводитель скорее всего контролирует ситуацию; степень 2 (максимальная) — суда опасно сблизятся, если не начнут маневр уклонения. При реализации рассматриваемой модели "на борту" или в береговой СУДС множества значений вектора $v^{(1)}$, соответствующие различным уровням опасности, визуализируются на соответствующей диаграмме "скорость—курс" различными способами (например, различным цветом или стилем).

Таблица 1

Система правил для дискретной оценки уровня опасности

№	(1)	(2)	(3)	u
1	—	—	—	0
2	—	—	+	0
3	—	+	—	0
4	—	+	+	0
5	+	—	—	0
6	+	—	+	1
7	+	+	—	0
8	+	+	+	2

Возможно представление степени опасности "судно—судно" непрерывной величиной. Для этого оказываются продуктивными идеи, реализованные в системах нечеткой логики. В этом случае правила (1), (2), (3) представляются лингвистическими переменными с соответствующими терминами и функциями принадлежности, а система правил (табл. 1) трансформируется в систему нечетких правил.

Рассмотрим интерпретацию задачи нечеткой системой типа Сугено. Введем отношение $f = \frac{\eta}{\theta}$ и соответствующую ей лингвистическую переменную P_f с терминами "Big" ("большое", безопасная ситуация) и "Little" ("малое", опасная ситуация) и функциями принадлежности типа "дополнение":

$$\rho_{\text{Little}}(f) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_f(f - c_f))};$$

$$\rho_{\text{Big}}(f) = \frac{1}{1 + \exp(-a_f(f - c_f))},$$

где a_f, c_f — настраиваемые параметры.

Введем лингвистическую переменную P_D , определяющую характер движения судна с терминами "Maneuverable" (маневренное) и "Constant" (равномерное) и функциями принадлежности типа "скачок":

$$\mu_{\text{Maneuverable}}(D) = \frac{1 + \text{sign } D}{2};$$

$$\mu_{\text{Constant}}(D) = \frac{1 - \text{sign } D}{2},$$

где D — функция детектора маневра.

Наконец, пусть лингвистическая переменная P_T описывает величину T (время, оставшееся до сближения) с терминами "Little" ("малое"), "Average" ("среднее") и "Large" ("большое") с функциями принадлежности типа "кластер":

$$\nu_{\text{Little}}(T) = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-a_1^T(T - c_1^T))};$$

$$\nu_{\text{Average}}(T) = \exp\left(-\frac{(T - c_2^T)^2}{a_2^T}\right);$$

$$\nu_{\text{Large}}(T) = \frac{1}{1 + \exp(-a_3^T(T - c_3^T))},$$

где $a_1^T, c_1^T, a_2^T, c_2^T, a_3^T, c_3^T$ — настраиваемые параметры. Описание лингвистической переменной P_T тремя терминами соответствует трем принятым в судоводительской практике значениям времени T [15]: время, когда существует возможность принять только одно решение, которое поможет избежать столкновения (терм "Little"); время, которое требу-

Система правил машины нечеткого вывода типа Сугено

	P_f	P_D	P_T	u
1	Little	Maneuverable	Little	1
2	Little	Maneuverable	Average	0
3	Little	Maneuverable	Large	0
4	Little	Constant	Little	2
5	Little	Constant	Average	1
6	Little	Constant	Large	0
7	Big	Maneuverable	Little	0
8	Big	Maneuverable	Average	0
9	Big	Maneuverable	Large	0
10	Big	Constant	Little	0
11	Big	Constant	Average	0
12	Big	Constant	Large	0

ется для грамотного проведения оптимального маневра, когда уже можно начинать маневрирование, но еще есть время "исправить" результат ошибочного маневрирования, есть время на "вторую попытку" (терм "Average"); время, когда пока не нужно предпринимать какие-либо действия, так как ситуация может измениться (терм "Large").

Величины f, D и T подаются на вход машины нечеткого вывода типа Сугено, на выходе которой формируется числовое значение $u \in [0, 2]$ — уровень опасности навигационной ситуации "судно—судно"; значение $u = 0$ соответствует наименьшему уровню опасности, $u = 2$ — наибольшему. Машина нечеткого вывода реализует систему нечетких правил (табл. 2).

Правило 1 (табл. 2) соответствует ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, но судоводитель скорее всего уже начал маневр уклонения (средний уровень опасности). Правила 4 и 5 соответствуют ситуации, когда суда могут недопустимо сблизиться, если не начнут маневр уклонения (правило 4 соответствует высокому уровню опасности). Обучение описанной нечеткой системы состоит в настройке параметров функций принадлежности и может быть проведено как экспертным способом, так и на обучающей выборке [16, 17]. Последний способ позволяет настроить параметры системы с учетом особенностей движения на конкретной акватории. Вместе с тем, формирование обучающей выборки для рассмотренной задачи достаточно трудоемко и само по себе требует привлечения экспертов. Поэтому здесь ограничимся только первым вариантом. При построении диаграммы "скорость—курс" множества значений вектора $v^{(1)}$, соответствующие различным уровням опасности, визуализируются, например, различными оттенками цветов.

Результаты численного моделирования задачи

Примем, что функции принадлежности термов переменных P_f и P_T имеют вид, представленный на рис. 3. При этом принимаются во внимание сле-

дующие соображения. Параметры a_f , c_f (рис. 3, а) выбраны так, чтобы учесть влияние ошибок измерений на определение отношения $f = \frac{\eta}{\theta}$; в идеале при $f < 1$ ситуация опасная, при $f > 1$ ситуация безопасная. Параметры a_1^T , c_1^T , a_2^T , c_2^T , a_3^T , c_3^T (рис. 3, б) отражают правила и особенности судоходства на конкретной акватории с точки зрения времени принятия решения и совершения маневра уклонения.

Для демонстрации построения диаграммы "скорость—курс" с учетом различных уровней опасности ситуации рассмотрим модельный пример для трех судов (рис. 4). Одно из них — I — будем считать управляемым судном. Судно II находится в точке с относительными координатами (3000, 3000) м, движется прямолинейно и равномерно с вектором скорости (−5, −5) м/с; судно III — в точке с относительными координатами (1000, 400) м, движется с вектором скорости (−5, 0) м/с и маневрирует. Радиус корабельного домена всех судов равен 150 м.

Визуализация степени опасности возможных скоростей и курсов движения (диаграмма "скорость—курс") управляемого судна I для навигационной ситуации рис. 4 показана на рис. 5: рис. 5, а — значения вектора скорости, соответствующие дискретной оценке уровня опасности (табл. 1) при $T^* = 300$ с; светло-серая область соответствует средней степени опасности $u = 1$, темная область соответствует высокой степени опасности $u = 2$; рис. 5, б — значения вектора скорости, соответствующие непрерывной оценке уровня опасности (табл. 2) с функциями принадлежности, представленными на рис. 3. При этом интенсивность оттенка серого цвета рисунка равна степени опасности $u \in [0, 2]$, деленной на 2. Оба варианта рис. 5, будучи представленными на рабочем месте оператора СУДС, позволяют наглядно оценить параметры безопасного движения судна и, в свою очередь, дать корректные рекомендации судоводителям.

Результаты натурных исследований

Было проведено моделирование предлагаемой методики визуализации опасных и безопасных параметров движения судна на данных о реальном движении судов [18]. На рис. 6 показано положение и скорости судов в заливе Находка. Темными кружками показаны покоящиеся суда, а также суда, движущиеся прямолинейно и равномерно. Светло-серыми кружками показаны маневрирующие суда. Длина стрелки соответствует скорости движения судна, направление стрелки — курсу судна. Выколотыми кружками (1, 2 и 3) показано моделируемое положение управляемых судов, для которых выполняется визуализация.

На рис. 7 показаны результаты визуализации опасных и безопасных возможных скоростей и курсов движения моделируемых управляемых судов 1—3 (рис. 6; примечание: некоторые суда-цели,

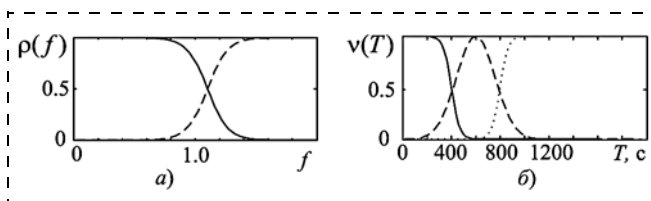


Рис. 3. Функции принадлежности термов переменных P_f и P_T . Рисунок (а): $\rho_{\text{Little}}(f)$ — сплошная, $\rho_{\text{Big}}(f)$ — штриховая. Рисунок (б): $v_{\text{Little}}(T)$ — сплошная, $v_{\text{Average}}(T)$ — штриховая, $v_{\text{Large}}(T)$ — пунктир

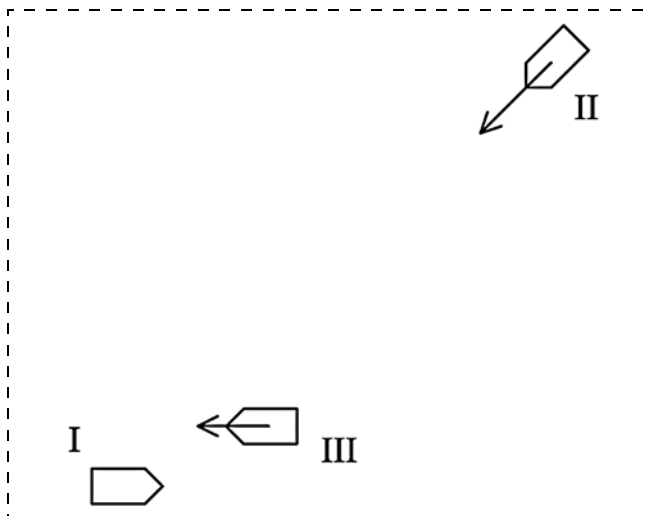


Рис. 4. Моделируемое расположение и скорости судов

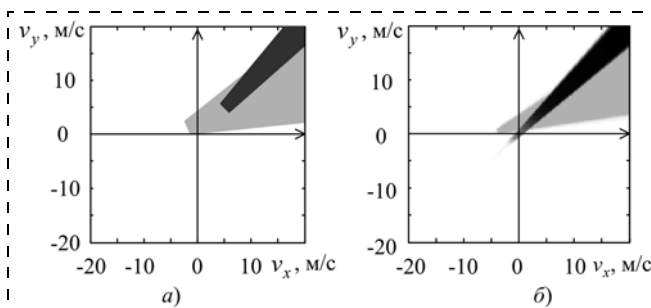


Рис. 5. Визуализация опасных и безопасных скоростей и курсов движения для навигационной ситуации рис. 4



Рис. 6. Расположение судов в заливе Находка

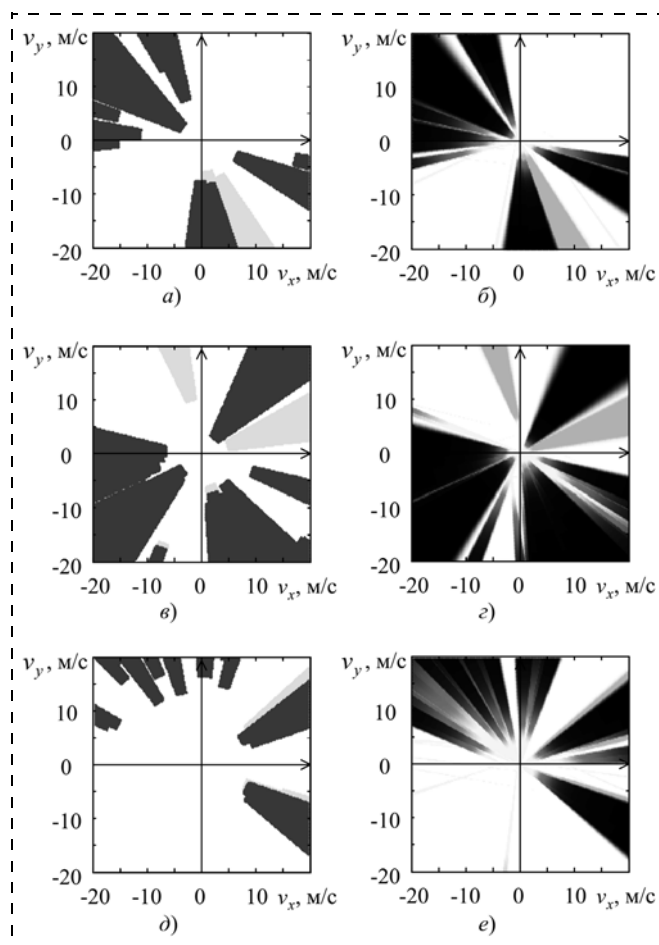


Рис. 7. Визуализация опасных и безопасных скоростей и курсов движения для навигационной ситуации рис. 6

по которым также проводился расчет, находятся за границами рис. 6). Рис. 7, а, б соответствуют судну 1, рис. 7, в, г — судну 2, рис. 7, д, е — судну 3. При этом в первой колонке рис. 7 (рис. 7, а, в, д) показаны значения компонент вектора скорости моделируемого судна, соответствующие уровням опасности $u = 1$ (светло-серые области) и $u = 2$ (темные области), определенным трехуровневой моделью табл. 1 для порогового значения времени $T^* = 300$ с. Во второй колонке (рис. 7, б, г, е) — значения компонент вектора скорости моделируемого судна, соответствующие различным уровням опасности, определенными нечеткой системой табл. 2 с функциями принадлежности, представленными на рис. 3; интенсивность оттенка серого цвета на рис. 7 равна степени опасности $u \in [0, 2]$, деленной на 2.

Видно, что, например, для судна 1 окружающая навигационная обстановка такова, что безопасным является лишь движение курсом северо-восток и юго-запад (рис. 7, а, б); для судна 2 безопасный выход из залива на юг сильно затруднен, хотя и возможен (рис. 7, в, г); для судна 3 вполне возможно безопасное движение в сторону пирса на юго-восток, но при этом скорость движения должна быть невелика (рис. 7, д, е).

В целом предлагаемая методика визуализации опасных и безопасных параметров движения управляемого судна применима как в береговых СУДС, так и в бортовой системе поддержки принятия решений, и позволяет решить задачу о выборе оператором СУДС и судоводителем той или иной траектории движения судна. Кроме того, по степени заполнения диаграммы "скорость—курс" элементами и насыщенности их цветов можно судить о психологической нагрузке на судоводителей в той или иной навигационной обстановке.

Заключение

В условиях высокой интенсивности трафика судоводителям и операторам СУДС требуются особые инструменты поддержки принятия решений. В работе предложен метод визуализации информации о навигационной обстановке на акватории, сочетающий в себе классические подходы Митрофанова [7] и Дегрэ, Лефевра [6] и комплекс математических моделей многоуровневой оценки риска опасного сближения судов [8–10]. Предложенный подход позволяет наглядно представлять информацию об опасных и безопасных параметрах движения судов на рабочем месте оператора СУДС и судоводителя. Одновременная визуализация полученных данных "на берегу" и "на борту" дает возможность обеспечить согласование действий оператора СУДС и судоводителя, что соответствует современной тенденции развития СУДС по пути углубления интеграции с судовыми системами и береговыми службами (е-навигация). Кроме того, разработанная модель представления информации о навигационной обстановке на акватории позволяет оценить эмоциональную нагрузку на судоводителей. Это открывает перспективную возможность постановки и решения задачи оценки степени опасности той или иной схемы движения конкретной акватории и выработки рекомендаций по изменению схемы движения в сторону менее опасных конфигураций.

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

Список литературы

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters // Journal of Navigation. 2009. Vol. 62, N. 3. P. 455–476.
2. Акмайкин Д. А., Хоменко Д. Б. Совместное определение параметров цели с помощью судовой РЛС и транспондера АИС // Эксплуатация морского транспорта. 2010. № 4. С. 48–51.
3. Сметанин С. И., Игнатюк В. А., Евстифеев А. А. Способ реализации программной веб-части системы спутникового мониторинга // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 6. С. (in Russian). 448–455.
4. Hughes C. T. When is a VTS is not a VTS // Journal of Navigation. 2009. Vol. 62, N. 3. P. 439–442.
5. Малеев П. И., Леденев Н. И. Особенности, состояние и перспективы развития е-навигации морских объектов // Навигация и гидрография. 2012. № 33. С. 16–20.

6. Degre T., Lefevre X. A collision avoidance system // Journal of Navigation. 1981. Vol. 34. P. 294–302.
7. Mitrofanov O. An anti-collision indicator // Journal of Navigation. 1968. Vol. 21. P. 163–170.
8. Гриняк В. М., Десятисильный А. С. Прогнозирование опасных ситуаций при управлении движением на море // Известия РАН. Теория и системы управления. 2004. № 3. С. 127–136.
9. Гриняк В. М., Десятисильный А. С. Система экспертного оценивания состояния навигационной безопасности морской акватории на основе нейро-нечеткой сети // Проблемы управления. 2015. № 4. С. 58–65.
10. Гриняк В. М., Десятисильный А. С. Нечеткая система распознавания опасного сближения судов на морских акваториях // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11. С. 36–42.
11. Szlapczynski R., Szlapczynska J. A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions // Journal of Navigation. 2015. Vol. 68. P. 1041–1055.
12. Бурмака А. И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2014. № 1. С. 20–22.

13. Дорожко В. М., Лебедева А. Н. Экспертные представления об основных ситуационных моделях коллективного движения судов // Проблемы управления. 2006. № 4. С. 43–49.
14. Десятисильный А. С., Дорожко В. М., Гриняк В. М. Информационно-технологические аспекты обеспечения безопасности движения на морских акваториях // Научно-техническая информация. Сер. 2: Информационные процессы и системы. 2003. № 7. С. 11–14.
15. Коноплев М. А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения // Эксплуатация морского транспорта. 2009. № 2. С. 34–39.
16. Бобырь М. В. Влияние числа правил на обучение нечетко-логической системы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2014. № 11. С. 28–35.
17. Лелеков С. Г., Лях А. М. Нечеткий вывод в адаптивных таксономических экспертных системах // Информационные технологии. 2015. Т. 21, № 12. С. 890–895.
18. Головченко Б. С., Гриняк В. М. Информационная система сбора данных трафика морской акватории // Научно-техническая информация. Сер. 2: Информационные процессы и системы. 2014. № 8. С. 24–28.

Expert System for Evaluation and Visualization of the Parameters of the Marine Traffic Safety

V. M. Grinyak, victor.grinyak@gmail.com,

Far Eastern Federal University, Vladivostok, 690922, Russian Federation,

O. A. Goroshko, olga.goroshko@vvsu.ru,

Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, 690014, Russian Federation,

A. S. Devyatisilny, devyatis@iacp.dvo.ru✉,

Institute of Automation and Control Processes, FEBRAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: Devyatisilny Aleksandr S., D. Sc., Chief Researcher, Institute of Automation and Control Processes, FEBRAS, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Received on May 30, 2016

Accepted on June 24, 2016

The topic of the paper is the problem of marine traffic control. A model of a relative motion of two vessels is considered. Marine traffic control is an exceptionally large scientific and technical challenge. In practice, such control is implemented by the onshore vessel traffic systems (VTSs), i.e., by specialized companies, whose main task is to prevent dangerous situations, such as ship collisions. Estimation of the parameters of the path of the motion of each vessel (coordinates, velocity, etc.) and their extrapolation are the methodological basis for recognition of the dangerously close approach of vessels. If the vessels are identified to be approaching each other dangerously, the traffic control system generates an alarm and recommendations to modify their motion paths. The control decision, which ensures the traffic safety, depends on a number of factors: the velocity of the vessels, the distance between them, their size, maneuverability, and the characteristics of their paths. The prediction of the shipping traffic always has an element of uncertainty, which requires a formalization of the verbal concept of a "dangerous situation" with the identification of different danger levels such as "very dangerous," "dangerous," and "safe." The danger levels are determined on the basis of the experience and navigation practice. This approach allows the ship driver and the coastal VTS operator to control their actions: to make different types of decisions in the situations with different danger levels and, thereby, to reduce the degree of uncertainty in making specific decisions. This paper is devoted to the study of a collision avoidance system for ships, which makes it possible to detect dangerous situations and estimate the danger level by a continuous value using the ideas of the fuzzy logic systems. The paper introduces a new approach to displaying information on targets. The proposed display visualizes three types of information: targets' motion parameters (typical for target tracking), combinations of the own course and speed, of colliding with those targets (typical for Collision Threat Parameters Area display by Mitrofanov and Degre, Lefevre model) and combinations of the own course and speed, which in this case are not compliant with the fuzzy logic risk assessment systems (based on the ships' motion parameters). A superposition of the last two types of data enables a navigator to quickly choose a collision avoidance maneuver, which would be sufficient. Additionally, the displayed data may be filtered on the basis of the remaining Time To Collision (TTC), so that the navigators can concentrate on the direct threats. The paper includes a description of the proposed visualization technique, as well as examples of the visualized data for some encounter situations in Nakhodka Bay.

Keywords: vessel traffic control, collision avoidance, trace, ship maneuver, fuzzy system

Acknowledgements: This work was supported by RFBR grant, project 15-08-00234

For citation:

Grinyak V. M., Goroshko O. A., Devyatisilny A. S. Expert System for Evaluation and Visualization of the Parameters of the Marine

Traffic Safety, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 127–134.

DOI: 10.17587/mau.18.127-134

References

1. Tam Ch. K., Bucknall R., Greig A. Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters, *Journal of Navigation*, 2009, vol. 62, no. 3, pp. 455–476.
2. Akmaykin D. A., Homenko D. B. *Sovmestnoye opredeleniye parametrov iseli s pomosh'yu sudovoy RLS I transpondera AIS* (The joint definition of the parameters of the goal with the help of the ship's radar and AIS transponder), *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2010, no. 4, pp. 48–51 (in Russian).
3. Smetanin S. I., Ignatyuk V. A., Evstifeev A. A. *Sposob realizatsii programmy veb-chasti sistemy sputnikovogo monitoring* (The method for implementing the program Web Parts satellite monitoring system), *Informatsionnye tehnologii*, 2015, vol. 21, no. 6, pp. 448–455 (in Russian).
4. Huges C. T. When is a VTS is not a VTS, *Journal of Navigation*, 2009, vol. 62, no. 3, pp. 439–442.
5. Maleev P. I., Ledenev N. I. *Osobennosti, sostoyaniye I perspektivi rasvitiya e-navigatsii morskikh objektov* (Features, the state and prospects of development of e-navigation offshore facilities), *Navigatsiya i Gidrografiya*, 2012, no. 33, pp. 16–20 (in Russian).
6. Degre T., Lefevre X. A collision avoidance system, *Journal of Navigation*, 1981, vol. 34, pp. 294–302.
7. Mitrofanov O. An anti-collision indicator, *Journal of Navigation*, 1968, vol. 21, pp. 163–170.
8. Grinyak V. M., Devyatisilny A. S. *Prognosirovaniye opasnykh situatsiy pri upravlenii dvizheniyem na more* (Prediction of dangerous situations in the management of sea traffic), *Izvestiya RAN. Teoriya i Sistemy Upravleniya*, 2004, no. 3, pp. 127–136 (in Russian).
9. Grinyak V. M., Devyatisilny A. S. *Sistema ekspertnogo otsenivaniya sostoyaniya navigatsionnoy besopasnosti morskoy akvatorii na osnove neyro-nechetkoy seti* (Expert estimation of navigation safety system state marine waters based on neuro-fuzzy network), *Problemy Upravleniya*, 2015, no. 4, pp. 58–65 (in Russian).
10. Grinyak V. M., Devyatisilny A. S. *Nechetkaya sistema raspoznavaniya opasnogo sblizheniya sudov na morskikh akvatoriayah* (Fuzzy dangerous proximity detection system on ships offshore), *Vestnik Komputernih i Informatsionnih Tehnologiy*, 2014, no. 11, pp. 36–42 (in Russian).
11. Szlapczynski R., Szlapczynska J. A target information display for visualising collision avoidance manoeuvres in various visibility conditions, *Journal of Navigation*, 2015, vol. 68, pp. 1041–1055.
12. Burmaka A. I. *Strategiya rashozhdeniya sudov v situatsii chresmernogo sblizheniya* (Strategy vessels differences in the situation of excessive proximity), *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota Imeni Admiral S. O. Makarova*, 2014, no. 1, pp. 20–22 (in Russian).
13. Dorozhko V. M., Lebedeva A. N. *Ekspertniye predstavleniya ob osnovnykh situatsionnykh modelyakh kollektivnogo dvizheniya sudov* (Expert understanding of the basic situational models of collective movements of ships), *Problemy Upravleniya*, 2006, no. 4, pp. 43–49 (in Russian).
14. Devyatisilny A. S., Dorozhko V. M., Grinyak V. M. *Informatsionno-tehnologicheskiye aspekty obespecheniya besopasnosti dvizheniya na morskikh akvatoriayah* (Information-technological aspects of safety in the offshore), *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya. Seriya 2: Informatsionnye Processy i Sistemy*, 2003, no. 7, pp. 11–14 (in Russian).
15. Konoplev M. A. *Primeneniye apparata nechetkoy logiki dlya opredeleniya urovnya opasnosti stolknoveniya* (Application of Fuzzy Logic to determine the level of danger of collision), *Ekspluatatsiya Morskogo Transporta*, 2009, no. 2, pp. 34–39 (in Russian).
16. Bobyr M. V. *Vliyaniye chisla pravil na obucheniye nechetkologicheskoy sistemy* (The impact of the rules on the training of fuzzy logic system), *Vestnik Komputernih i Informatsionnih Tehnologiy*, 2014, no. 11, pp. 28–35.
17. Lelekov C. G., Lyah A. M. *Nechetkiy vivod v adaptivnykh taxsonomicheskikh ekspertnykh sistemah*, *Informatsionnye tehnologii* (Fuzzy adaptive output in taxonomic expert systems), 2015, vol. 21, no. 12, pp. 890–895 (in Russian).
18. Golovchenko B. S., Grinyak V. M. *Informatsionnaya sistema sbora dannykh trafika morskoy akvatorii* (Information system of sea area of traffic data collection), *Nauchno-Tekhnicheskaya Informatsiya. Seriya 2: Informatsionnye Processy i Sistemy*, 2014, no. 8, pp. 24–28 (in Russian).

УДК 629.78

DOI: 10.17587/mau.18.134-143

Я. Г. Сапунков, канд. физ.-мат. наук, доц.,

А. В. Молоденков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., iptmuran@san.ru,

Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов

Алгоритм оптимального по энергии разворота осесимметричного космического аппарата в классе конических движений

Рассматривается задача оптимального в смысле минимума энергетических затрат разворота космического аппарата как твердого тела с одной осью симметрии в кватернионной постановке. С помощью замен переменных исходная задача упрощается (в смысле динамических уравнений Эйлера) до задачи оптимального разворота твердого тела со сферическим распределением масс, содержащей одно дополнительное скалярное дифференциальное уравнение. Для этой задачи представлено новое аналитическое решение в классе конических движений, при этом возникают ограничения на вид начального и конечного значений вектора угловой скорости. Дается алгоритм оптимального разворота космического аппарата. Приводится числовой пример.

Ключевые слова: оптимальное управление, космический аппарат, осесимметричное твердое тело, коническое движение

Введение

Построение управления пространственной переориентацией космического аппарата (КА) как твердого тела в традиционной постановке включает задачи нахождения программного углового движения (разворота), программного управления и поиска управления, стабилизирующего программу углового движения в малом. Задача расчета программного углового движения и реализующего его управле-

ния во многих случаях решается с помощью методов теории оптимального управления. Точное аналитическое решение этой задачи для наиболее часто используемых функционалов оптимизации при произвольных граничных условиях по угловому положению и угловой скорости КА не найдено даже в случае сферической симметрии КА, не говоря уже о его произвольной динамической конфигурации. Известны лишь некоторые частные случаи решения задачи (см., например, работы [1–11], среди