

В. М. Гриняк¹

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Многоуровневая модель оценки безопасности движения морских судов в ограниченных водах

Статья посвящена проблеме навигационной безопасности движения морских судов в ограниченных водах. Имея в виду задачу «судно-берег» рассматривается подход, позволяющий вырабатывать тревожные сигналы с выделением различных уровней опасности. В основу критерия разделения уровней опасности положены траекторные свойства движения судов. Предложена система правил, апеллирующая к модельным представлениям типа «судно-берег» и позволяющая упорядочить действия диспетчера при управлении коллективным движением судов. Приводятся результаты моделирования задачи в типичных ситуациях, подтверждающие конструктивность предлагаемых идей.

Ключевые слова и словосочетания: управление движением судов, оценка риска столкновения, траектория движения, маневрирование судна, вероятность.

V. M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok. Russia

Multy-level model for ships collision risk assessment in restricted waters

The problem of marine vessel traffic control in restricted waters is discussed in this paper. Information system model for marine safety estimation (ship collision avoidance) is watched. System defines some alarm levels: "green", "yellow" and "red". An alarm criterion is based on maneuver detector. If the ship is maneuvering its alarm level decreases ("yellow"). Mathematical model of position and velocity estimation for alarm generating are offered. Some results of experiments are shown, such as numerical experiments for typical ships traces.

Key words: vessel traffic control, risk assessment, trace, ship maneuver, probability.

Навигационная безопасность коллективного движения судов – актуальная проблема эксплуатации водных транспортных путей [1]. Её обеспечение возложено на береговые системы управления движением судов (СУДС). В соответствии с общепринятой концепцией построения таких систем их задачи реализуются с использованием измерительной информации, доставляемой радарными и спутниковыми средствами траекторных измерений – транспондерами Автоматической идентификационной системы (АИС) [2].

¹Гриняк Виктор Михайлович – доцент кафедры информационных технологий и систем Института информационных технологий; e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

Определение судов, чьё движение рассматривается как потенциально опасное (ведёт к столкновению), и выработка тревожных сигналов являются центральной функцией, реализующей целевое назначение СУДС. Тревожный сигнал служит указанием оператору СУДС, на основании которого он принимает решение о необходимости изменения курса и скорости движения; при этом число объектов, для которых в текущий момент времени может быть выработан тревожный сигнал, увеличивается с ростом интенсивности движения [3]. Это приводит к расширению множества управленческих решений, способных обеспечить безопасное движение, и возрастанию неопределённости при принятии конкретного решения, что является побудительным мотивом дополнительно учитывать тип навигационной ситуации и выделять различные уровни опасности (типа «очень опасная», «опасная», «почти безопасная» и т.п.) [4]. Такой подход позволяет оператору СУДС упорядочить свои действия согласно установленному приоритету (например, в случаях, когда одновременно присутствуют несколько тревожных сигналов, принимать решения по наиболее опасным из них).

Настоящая статья посвящена изучению модели задачи предупреждения об опасном сближении типа «судно-берег». Несмотря на то, что этому вопросу посвящено достаточно много публикаций [5], он продолжает оставаться актуальным для практики. Рассматриваемый в статье класс моделей реализует специализированный подход, предназначенный для обработки потока измерительной информации, поступающей от радаров и/или АИС. Наличие случайной компоненты, обусловленной инструментальной погрешностью измерений, предопределяет выбор для распознавания опасных ситуаций моделей вероятностного типа.

Модельные представления задачи

Введём правую ортогональную систему отсчёта oxy , с осью y , направленной на Север, и осью x , направленной на Восток. Пусть измеряемыми параметрами являются декартовы координаты объекта. В этом случае модель измерений выглядит так:

$$z_x(t_k) = x(t_k) + \xi_x(t_k), \quad (1)$$

$$z_y(t_k) = y(t_k) + \xi_y(t_k),$$

где $x(t_k), y(t_k)$ – декартовы координаты наблюдаемого объекта в момент времени t_k , $\xi_x(t_k), \xi_y(t_k)$ – случайные инструментальные ошибки измерений.

В условиях естественного отсутствия при внешнем наблюдении данных о силах и моментах, действующих на объект и обуславливающих его траекторию на интервале наблюдения, будем описывать эволюцию координат объекта простейшими полиномиальными моделями:

$$x(t) = x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)} (t - t_0)^i, \quad (2)$$

$$y(t) = y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)} (t - t_0)^i,$$

где N_x, N_y – порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат, $a_1^{(x)}, a_1^{(y)}$ – полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных.

Таким образом, о системе уравнений ((1), (2)) можно говорить как о модели задачи наблюдения, целью решения которой является определение вектора оце-

нок $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$, причём момент времени может как принадлежать интервалу наблюдения, так и лежать вне его. При этом в силу вероятностного характера значений оценок вектор $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ имеет смысл только вместе с информацией о характеристиках случайных погрешностей оценивания (величинах $\Delta x(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, $\Delta y(t) = y(t) - \hat{y}(t)$).

Рассмотрим варианты формализации понятия «опасная ситуация» в рамках модели ((1), (2)). Разделим наблюдаемую СУДС акваторию на две зоны: участок, где движение судов возможно без ограничений (разрешённую зону, множество Y), и участок, где движение судов запрещено (запрещённую зону, множество N). Определим корабельный домен [6, 7] S° в виде круга радиуса R° , очерченного вокруг условной точки – центра судна. Будем трактовать этот домен в статическом смысле как зону, вторжение в которую интерпретируется как опасность. В этом случае за опасную ситуацию можно принять факт наличия (в данный момент времени) непустого пересечения множеств N и S° .

Пусть положение наблюдаемого объекта в данный момент времени t характеризуется оценкой его координат – вектором $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ и функцией плотности распределения вероятностей оценок $f(x, y)$. Опишем возможные способы определения понятия «вероятность опасной ситуации».

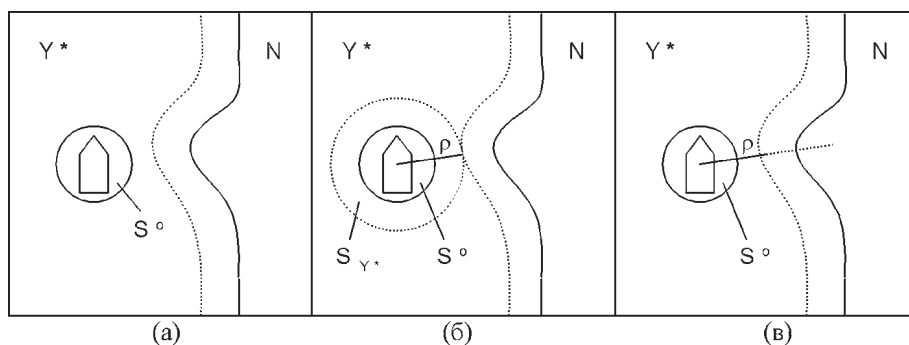


Рис. 1. Иллюстрация понятий, используемых при моделировании опасной ситуации для случая «судно-берег»

1. Рассмотрим разрешённую зону Y . В рамках неё выделим зону Y^* – множество разрешённых положений центра судна (т.е. приведём Y к Y^* с учётом радиуса корабельного домена (рис. 1а). Если $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ – оценка положения центра объекта, а $f(x, y)$ – функция плотностей распределения вероятностей оценок, то вероятность того, что $(x(t), y(t))^T \in Y^*$ (т.е. корабельный домен в момент времени лежит в безопасной зоне), может быть найдена по формуле:

$$P_{Y^*}(t) = \int_{Y^*} f(x, y) dx dy \quad (3)$$

2. Как и в первом случае, приведём зону Y к Y^* . Пусть $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in Y^*$. Обозначим через ρ минимальное расстояние от до границы и введём понятие круга безопасности объекта S_{Y^*} – круга с центром $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))$ и радиусом ρ (рис. 1б); как видно из рисунка, S_{Y^*} не следует отождествлять с корабельным доменом (S°). Ве-

роятность того, что $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in S_{Y^*}$ (т.е. центр судна в момент времени t лежит в круге безопасности), может быть найдена по формуле:

$$P_{S_{Y^*}}(t) = \int_{S_{Y^*}} f(x, y) dx dy \quad (4)$$

В случае, когда $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \notin Y^*$, примем $P_{S_{Y^*}}(t) = 0$.

3. Рассмотрим вектор оценок координат объекта $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$ и зону Y^* . Пусть $|\rho|$ – минимальное расстояние от точки $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))$ до границы Y^* , причём $\rho > 0$, если $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \in Y^*$, и $\rho > 0$, если $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T \notin Y^*$ (рис. 1в). Если $f(\rho)$ – функция плотности распределения вероятностей случайной величины (вероятностный характер которой обусловлен статистикой $(\hat{x}(t), \hat{y}(t))^T$), то вероятность того, что $\rho > 0$ в момент времени t (т.е. центр объекта лежит в зоне Y^*), можно определить по формуле:

$$P_{\rho > 0}(t) = \int_0^{\infty} f(\rho) d\rho \quad (5)$$

Величины $P_{Y^*}(t)$, $P_{S_{Y^*}}(t)$ и $P_{\rho > 0}(t)$ можно интерпретировать как вероятности безопасной ситуации в момент времени (безопасного положения судна по отношению к берегу). Соответственно, величины $1 - P_{Y^*}(t)$, $P_{S_{Y^*}}(t)$ и $P_{\rho > 0}(t)$ можно принять в качестве вероятностей опасной ситуации.

Метод решения задачи. Предлагаемый в работе метод оценки вектора состояния задачи ((1), (2)) связан с её сведением к конечномерному виду задачи метода наименьших квадратов:

$$\begin{aligned} z_x(t_k) &= x(t_0) + \sum_{i=1}^{N_x} a_i^{(x)}(t_k - t_0)^i + \xi_x(t_k), \\ z_y(t_k) &= y(t_0) + \sum_{i=1}^{N_y} a_i^{(y)}(t_k - t_0)^i + \xi_y(t_k), \\ k &= \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $x(t_0), y(t_0)$ – декартовы координаты наблюдаемого объекта в момент времени t_0 , $\xi_x(t_k), \xi_y(t_k)$ – случайные инструментальные ошибки измерений, N_x, N_y – порядок полинома, применяемого при описании эволюции координат, $a_i^{(x)}, a_i^{(y)}$ – полиномиальные коэффициенты, отождествляемые со скоростями объекта и приведёнными значениями старших производных, m – количество измерений, участвующих в оценке.

Представление исходной задачи ((1), (2)) в виде (6) и применение метода наименьших квадратов дают возможность достаточно просто определить функцию плотности распределения вероятности координат объекта $f(x, y)$. Так, можно показать, что в этом случае близка к плотности двумерного нормального распределения со средним $(x(t_0), y(t_0))^T$ и дисперсиями $\sigma_x^2(t_0), \sigma_y^2(t_0), \sigma_{xy}^2(t_0)$, соответствующими дисперсионной матрице задачи (6).

Разделим наблюдаемые объекты на два класса: движущиеся прямолинейно и равномерно, для описания которых будем пользоваться моделью (2) при $N_x = 1$,

$N_y = 1$, и маневрирующие, траекторию которых опишем моделью (2) при $N_x = 2$, $N_y = 2$. В рамках решения задачи ((1), (2)) предлагается следующий алгоритм выделения маневрирующих объектов. Пусть \hat{a}_x, \hat{a}_y и $\sigma_{a_x}^2, \sigma_{a_y}^2$ – значения оценок ускорений объекта и их дисперсий, вычисленные в рамках модели (6). Тогда вероятность того, что нулевые значения ускорений a_x, a_y не входят в область их вероятных значений, могут быть определены формулами:

$$P(a_x \neq 0) = \int_0^{2|\hat{a}_x|} f_{a_x}(\tau) d\tau, \quad P(a_y \neq 0) = \int_0^{2|\hat{a}_y|} f_{a_y}(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где $f_{a_x}(\tau), f_{a_y}(\tau)$ – функции плотностей нормального распределения со средними $|\hat{a}_x|, |\hat{a}_y|$ и дисперсиями $\sigma_{a_x}^2, \sigma_{a_y}^2$. Решение о том, что объект является маневрирующим, принимается в том случае, если значение $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$ превышает некоторый порог. В противном случае принимается решение о неопределённой ситуации.

Имея в виду модельные представления ((1)–(2)), определим следующие вербальные уровни опасности для объекта. Под ситуацией с уровнем опасности «красная тревога» (RED) будем понимать ситуацию, когда возникновение опасности возможно без изменения текущего курса и скорости движения. С уровнем опасности «желтая тревога» (YELLOW) назовём ситуацию, когда возникновение опасности имеет место при маневрировании судна. Уровнем «отсутствие тревоги» (GREEN) будем называть случай, когда возникновение опасности маловероятно при любом типе движения [8–10].

Введём величины P_1^c, P_2^c , определяемые в зависимости от типа объекта:

$P_1^c = \min_{T_1} P(t)$ – для объектов, движущихся прямолинейно и равномерно;

$P_2^c = \min_{T_2} P(t)$ – для маневрирующих объектов,

где T_1, T_2 – время прогнозирования траектории для модели соответствующего порядка, $P(t)$ – вероятность безопасной ситуации, определяемая как (3), (4) или (5).

Таблица 1

Система правил определения уровня опасности в задаче «судно-берег»

№ п/п	$P_1^c < p^*$	$P_2^c < p^*$	d	GREEN	YELLOW	RED
1	+	+	1		+	
2	+	+	0			+
3	+	-	1	+		
4	+	-	0			+
5	-	+	1		+	
6	-	+	0		+	
7	-	-	1	+		
8	-	-	0	+		

В соответствии с описанными модельными представлениями предлагается следующая дискретная система правил соотнесения уровней опасности с вычис-

ленными значениями вероятностей P_1^c и P_2^c (табл. 1). Здесь ρ^* – некоторый порог безопасности, с которым сравниваются значения P_1^c, P_2^c ; d – значения детектора маневра, причём $d = 1$, если манёвр зафиксирован, и $d = 0$ в случае неопределённой ситуации; «GREEN», «YELLOW», «RED» – соответствующие вербальные значения уровня опасности.

Подводя итог описанию концепции решения рассматриваемой задачи предупреждения об опасном сближении судов в рамках модельных представлений (1) – (2), кратко сформулируем основные этапы алгоритма её решения:

- формирование вектора измерений координат для каждого из наблюдаемых объектов;
- оценка векторов состояния объектов в рамках модельных представлений (6) при $N_x = 1, N_y = 1$ и при $N_x = 2, N_y = 2$. Определение характеристик случайных погрешностей оценивания координат объектов;
- принятие решения об отнесении объекта к классу маневрирующих;
- решение задачи прогнозирования опасной ситуации «судно-берег» (определение величин P_1^c, P_2^c при заданных интервалах прогнозирования T_1, T_2 и соотнесение их с системой правил табл. 1 при заданных значениях порогов ρ^*);
- выдача соответствующего сигнала тревоги.

На практике определение в условиях внешнего наблюдения по конкретному судну уровня «GREEN» означает, что его движение не представляет опасности; уровня «YELLOW» означает, что опасная ситуация возможна, но при этом судно маневрирует, то есть судоводитель, скорее всего, сам контролирует ситуацию и старается придать движению безопасный характер; уровня «RED» – движение судна ведёт к опасности и необходимо начать манёвр уклонения [11–13].

Результаты численного моделирования

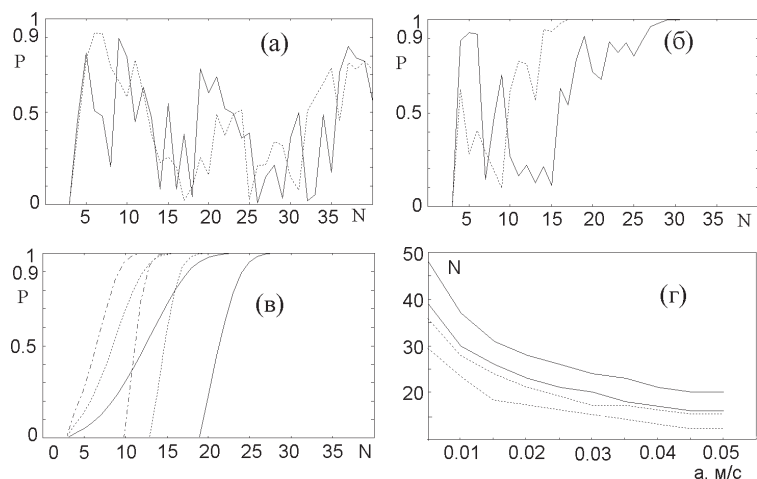


Рис. 2. Результаты решения задачи выделения маневрирующих объектов

Предваряя описание численного исследования, отметим, что оно проводилось для случая, когда информационная база СУДС состоит из одной РЛС. Тем не менее, рассматриваемые модели и алгоритмы могут быть легко модифицированы

для случая нескольких РЛС и/или использования средств спутниковой навигации – транспондеров Автоматической идентификационной системы (АИС). Кроме того, система может быть реализована не только в береговой СУДС, но и на борту судна.

При постановке вычислительного эксперимента использовались следующие данные об РЛС: погрешности измерений $\xi_x(t_k)$, $\xi_y(t_k)$ – нормально распределённые некоррелированные случайные величины со среднеквадратичным отклонением 3 м, период обращения антенны РЛС равен 3 с.

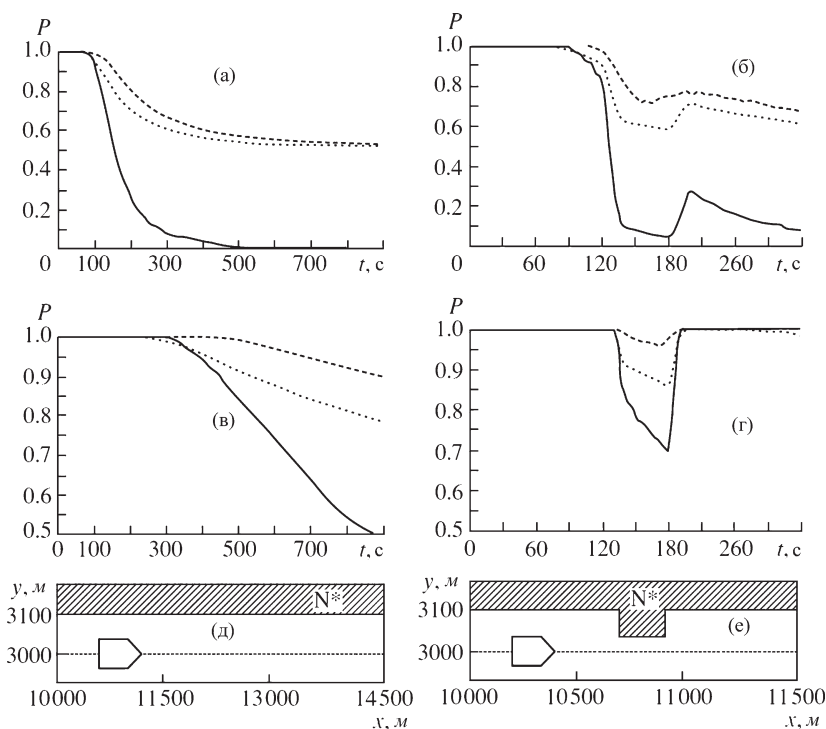


Рис. 3. Свойства модельных представлений вероятностей безопасной ситуации в задаче «судно-берег»

Рисунок 2 иллюстрирует некоторые результаты решения задачи выделения маневрирующих объектов, имея в виду формулы (7). На рисунке 2а показаны вычисленные согласно (7) значения вероятностей $P(a_x \neq 0)$ (сплошная линия) и $P(a_y \neq 0)$ (точки) при различном числе измерений для объекта, движущегося прямолинейно и равномерно со скоростью 5 м/с. На рисунке 2б показаны вычисленные значения тех же вероятностей для объекта, движущегося ускоренно с ускорением 0,02 м/с². Видно, что для данного конкретного случая устойчивое выделение маневрирующего объекта возможно для числа измерений $N \geq 17$ (надёжное решение данной задачи, как показали опыты, позволяет получить порог вероятности 0,99). На рис. 2в показаны средние значения и нижние границы вычисленных $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$ для ускорений объекта, равных 0,01 м/с² (сплошные линии), 0,02 м/с² (точки) и 0,05 м/с² (штрих-пунктир). Видно, что, например, объект, движущийся с ускорением 0,02 м/с² будет выделен как маневрирующий в полови-

не случаев при $N = 15$ (верхняя кривая из точек приближается к 1) и в 95% случаев при $N = 19$ (нижняя кривая из точек приближается к 1); для объекта, движущегося с ускорением $0,01 \text{ м/с}^2$ соответствующие значения N равны 23 и 28. Рисунок 2г иллюстрирует зависимость необходимого для детекции маневра числа измерений (среднего и максимального) от значения ускорения наблюдаемого объекта при различных погрешностях оценивания, а именно, при среднеквадратичном отклонении $\xi_x(t_k)$, $\xi_y(t_k)$, равном 3 м (точки) и 6 м (сплошные линии).

На рисунке 3 показаны свойства различных модельных представлений вероятностей безопасной ситуации в задаче «судно-берег». Так, приведены вычисленные согласно (3), (4) и (5) вероятности $P_{y*}(t)$ (пунктир), $P_{S_y}(t)$ (сплошная линия) и $P_{p>0}(t)$ (точки) для модели движения объекта первого (рис. 3в, г) и второго порядка (рис. 3а, 3б). Здесь t – интервал прогнозирования траектории, P – значения соответствующих вероятностей. Объект двигался со скоростью 5 м/с, интервал наблюдения составлял 30 с для модели первого порядка (что при периоде измерений 3 с соответствует 10 измерениям) и 1 минуту для модели движения второго порядка (что соответствует 20 измерениям). Радиусы корабельных доменов принимались равными 100 м. При этом для левой колонки рисунков (рис. 3а, в) моделировалась ситуация, когда приведённая запрещённая зона ограничена прямой линией (рис. 3д), а ситуация для рис. 3б и г (правая колонка) рассматривалась для случая, когда приведённая запрещённая зона имеет выступ (рис. 3е).

Исходя из данных рис. 3 можно сделать вывод, что при росте интервала прогнозирования корректное заключение о безопасности ситуации (при данных свойствах объекта, акватории и измерителей) можно сделать при $t < 100$ с для модели второго порядка (рис. 3а) и $t < 300$ с для модели первого порядка (рис. 3в). Кроме того, можно утверждать (рис. 3б, г), что принятая модель вполне корректно «реагирует» на изменения уровня безопасности, вызванные особенностями геометрии запрещённой/разрешённой зоны.

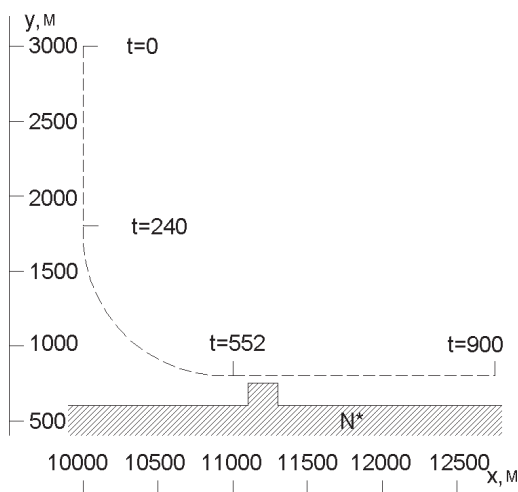


Рис. 4. Моделируемая траектория движения судна

На рисунке 4 показана моделируемая траектория движения объекта и конфигурация запрещённой зоны (скорость движения объекта равна 5 м/с), а на рис. 5 изображены результаты моделирования рассматриваемой задачи предупреждения об опасном сближении типа «судно-берег». На рисунке 5а показаны вычисленные значения $\max[P(a_x \neq 0), P(a_y \neq 0)]$, а на рис. 5б – соответствующие значения детектора манёвра d . Видно, что решение о том, что наблюдаемый объект является маневрирующим принимается в интервале времени [280 с, 585 с] с некоторым запаздыванием относительно истинного манёвра судна (интервал истинного манёвра показан на рис. 5а заштрихованной областью).

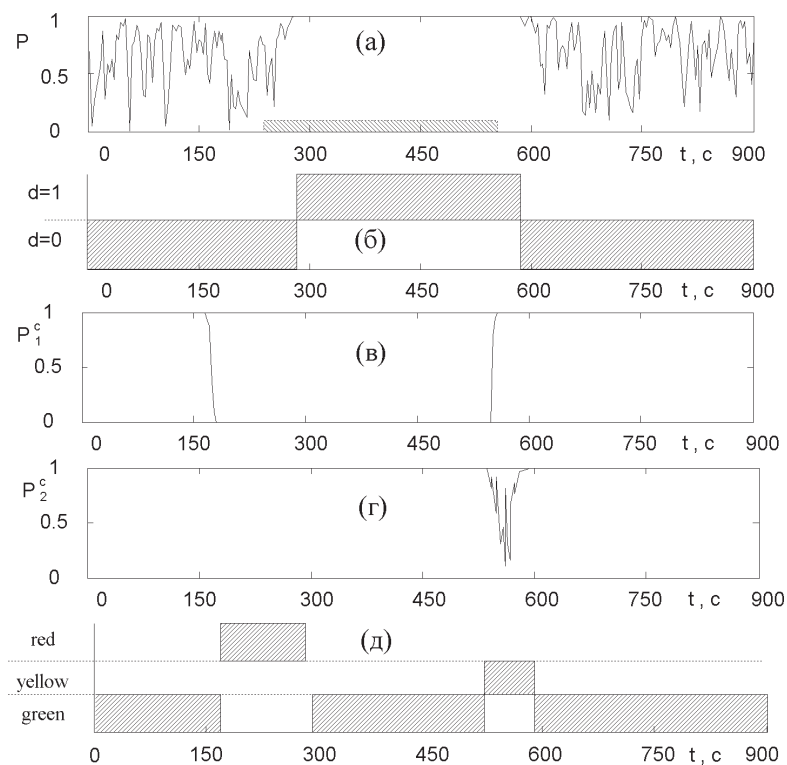


Рис. 5. Результаты моделирования задачи предупреждения об опасном сближении: случай «судно-берег»

На рисунках 5в и г приведены вычисленные значения вероятностей безопасного движения P_1^c и P_2^c для случая $T_1 = 300$ с, $T_2 = 60$ с и $P(t) = P_{S^*}(t)$, а на рис. 5д – соотношение уровней опасности с вычисленными значениями вероятностей согласно табл. 1.

Из рисунка 5 видно, что дополнительный учет информации о маневрировании судна позволяет построить вполне конструктивную систему принятия решения о степени опасности навигационной ситуации.

Рассмотренный в статье подход к решению задачи предупреждения об опасном сближении судов позволяет наглядно представить особенности навигацион-

ной обстановки. Предложенная цветовая интерпретация уровней тревоги типа «красный» и «желтый» интуитивно понятна судоводителям и операторам СУДС.

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

1. Моисеев Г.А. Безопасность морского судоходства / Г.А. Моисеев // Транспорт: наука, техника, управление. – 2010. – №12. – С. 43–45.
2. Ростопшин Д.Я. О проблемах использования данных автоматической идентификационной системы в задачах управления движением судов / Д.Я. Ростопшин, Д.А. Антонова // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – №9. – С. 63–69.
3. Бродский П.Г. К вопросу оценки влияния интенсивности судоходства на аварийность / П.Г. Бродский, Ю.В. Румянцев, С.Н. Некрасов // Навигация и гидрография. – 2010. – №30. – С. 36–42.
4. Коноплев М.А. Применение аппарата нечеткой логики для определения уровня опасности столкновения / М.А. Коноплев // Эксплуатация морского транспорта. – 2009. – №2. – С. 34–39.
5. Гриняк В.М. Обзор методов обеспечения безопасности движения морских судов / В.М. Гриняк // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2014. – №3. – С. 27–47.
6. 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. – №3. – P. 455–476.
7. Шубин А.Б. Близкое к оптимальному управление траекторией движения объекта / А.Б. Шубин, Е.Г. Александров, Г.Г. Харченко // Проблемы управления. – 2010. – №3. – С. 73–78.
8. Гриняк В.М. Распознавание опасных ситуаций системами управления движением судов / В.М. Гриняк, Б.С. Головченко, В.Н. Малько // Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – №8. – С. 42–45.
9. Сазонов А.Е. Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А.Е. Сазонов, В.В. Дерябин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2013. – №3. – С. 6–13.
10. Бурмака А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения / А.И. Бурака // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. – 2014. – №1. – С. 20–22.
11. Гриняк В.М. Нечеткая система распознавания опасного сближения морских судов / В.М. Гриняк // Транспорт: наука, техника, управление. – 2014. – №6. – С. 6–10.
12. Головченко Б.С. Нечёткая система предупреждения об опасном сближении морских судов / Б.С. Головченко, В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – №1. – С. 15–25.
13. Головченко Б.С. Информационная система сбора данных трафика морской акватории / Б.С. Головченко, В.М. Гриняк // Научно-техническая информация. Сер. 2: Информационные процессы и системы. – 2014. – №8. – С. 24–28.