

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

Статья посвящена обеспечению безопасности движения в акваториях морских портов. Приведены формализованные представления безопасности движения, сводящиеся к четырёхуровневой системе, ориентированной на экспертные управленческие решения и повышение устойчивости по отношению к проблеме генерации ложных выводов.

Ключевые слова: информационные технологии, управление движением судов, безопасность движения.

Обеспечение навигационной безопасности движения судов является актуальной проблемой эксплуатации водных транспортных путей. В зонах высокой интенсивности движения основными средствами её решения служат бортовые и береговые системы управления движением судов (СУДС), представляющие собой особый инструмент информирования судоводителя о возможном наступлении опасной ситуации (столкновении).

Хотя действующие отечественные и международные правила прямо регламентируют, что управление судном есть исключительное право его капитана, они, наряду с этим, также предписывают применение автоматизированных средств сбора и обработки навигационной информации и выработки в случае опасности возможных способов её разрешения.

Генерация тревожного сигнала по какому-либо объекту или их группе служит указанием судоводителю (и/или оператору СУДС), на основании которого он принимает (или не принимает) решение об изменении курса и скорости движения.

Множество допустимых управленческих решений, способных обеспечить безопасное движение, зависит от целого ряда факторов, определяемых конкретной навигационной обстановкой: скоростей судов, расстояния между ними, их размеров, маневренности, характеристик траектории и др. Это, а также то обстоятельство, что непосредственное

¹ © Виктор Михайлович Гриняк, доцент кафедры Информационных систем и компьютерных технологий Института информатики, инноваций и бизнес-систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, Приморский край, 690014, Россия, E-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

прогнозирование движения судов всегда несёт в себе элемент неопределённости, требует формализации вербального понятия «опасная ситуация» с ориентацией на выработку управленческих решений системой экспертного типа, то есть, фактически, определения и выделения различных уровней опасности: «очень опасная», «опасная», «почти безопасная» и т.п. Такой подход предоставляет возможность судоводителю (и/или оператору СУДС) упорядочить свои действия согласно установленного приоритета (то есть принимать различные типы решений в ситуациях с различным уровнем опасности) и, соответственно, понизить степень неопределённости при принятии конкретного решения.

В настоящей работе рассматриваются базовые элементы концепции и моделей, ориентированные на разработку и исследование системы оценки состояния безопасности коллективного движения морских судов по потокам навигационной информации, поступающим от береговых (радиолокационные станции кругового обзора — РЛС) и/или бортовых (транспондеры) средств траекторных измерений.

Основные модельные представления и постановка задачи

При моделировании навигационной безопасности коллективного движения прибегнем к традиционному приближению — построению модели безопасности «судно-судно» для каждой пары судов (такой подход применяется во многих известных алгоритмах предупреждения столкновений [1, 2]).

Не теряя общности, рассмотрим береговую СУДС, реализующую внешнее наблюдение и имеющую информационной основой РЛС кругового обзора (измеряющую расстояние и азимут). Обычно антенны береговых РЛС устанавливаются на высотах в несколько десятков метров над уровнем моря, что обеспечивает надёжный контроль морского пространства на дальностях в несколько десятков километров. С учётом этих расстояний и погрешностей радиолокационных измерений можно пренебречь разницей между ходом радиолуча в атмосфере и геометрической дальностью до лоцируемого объекта и, кроме того, модельные исследования выполнять в местной декартовой системе координат.

Введём правую ортогональную систему отсчёта Oxy , с центром O , связанным с осью вращения антенны РЛС, осью Y , направленной на Север, и осью X , направленной, соответственно, на Восток. Измерение координат каждого судна описывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} z_x &= z_r \sin z_\varphi \\ z_y &= z_r \cos z_\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

V. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗНАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

где z_x, z_y — измеренные координаты судна x и y , z_r, z_φ — измеренные РЛС расстояние до судна r и φ . При этом $z_x = x + \xi_x, z_y = y + \xi_y$, где ξ_x, ξ_y — случайные ошибки измерений координат судна, обусловленные наличием инструментальных ошибок измерений расстояния ξ_r и угла ξ_φ , причём приближённо можно считать, что $\xi_x = \xi_r \sin \varphi + \xi_\varphi r \cos \varphi + \xi_r \xi_\varphi \cos \varphi, \xi_y = \xi_r \cos \varphi - \xi_\varphi r \sin \varphi + \xi_r \xi_\varphi \sin \varphi$ (данные соотношения являются следствиями линеаризации уравнений измерений (1)).

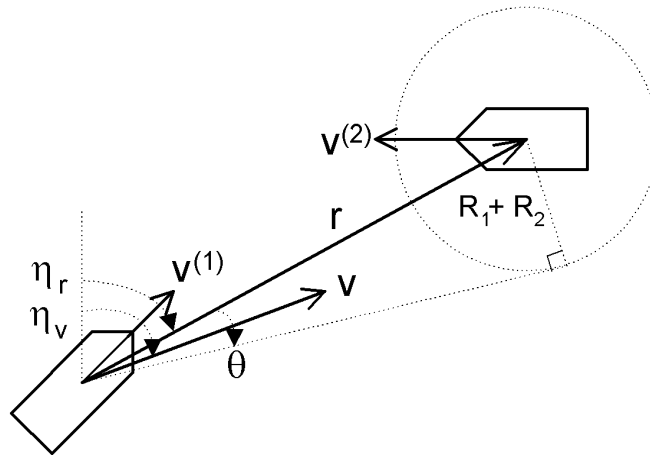


Рис. 1

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 $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)^T$ — вектором состояния коллективного движения двух судов, где $r_x = x^{(2)} - x^{(1)}, r_y = y^{(2)} - y^{(1)}$ — координаты вектора относительного положения судов, $v = \sqrt{(v_x^{(1)} - v_x^{(2)})^2 + (v_y^{(1)} - v_y^{(2)})^2}$ — скорость относительного движения судов, η_v — направление вектора скорости относительного движения судов, $w_v = \frac{d\eta_v}{dt}$ — скорость изменения угла η_v (рис. 1).

Примем следующие модельные представления об эволюции вектора состояния коллективного движения:

$$\begin{aligned} \dot{r}_x(t) &= -v \sin(\eta_v(t_*) + w_v(t - t_*)), \\ \dot{r}_y(t) &= -v \sin(\eta_y(t_*) + w_y(t - t_*)), \\ \dot{v} &= 0, \\ \dot{w}_v &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

С учётом (1) и (2) будем иметь следующие уравнения измерений:

$$\begin{aligned} z_{rx}(t_i) &= z_x^{(2)} - z_x^{(1)} = \\ &= r_x(t_*) + \frac{v}{w_v} [\cos(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v) - \cos(\eta_v(t_*))] + \xi_{rx}, \\ z_{ry}(t_i) &= z_y^{(2)} - z_y^{(1)} = \\ &= r_y(t_*) - \frac{v}{w_v} [\sin(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v) - \sin(\eta_v(t_*))] + \xi_{ry}, \\ i &= \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $z_{rx}(t_i)$, $z_{ry}(t_i)$ — измерения соответствующих проекций вектора относительного положения судов, полученные в момент времени t_i ; $\eta_v(t_*)$ — значение угла η_v в момент времени t_* ; ξ_{rx} , ξ_{ry} — случайные ошибки измерений; N — число измерений. Решением системы уравнений (3) является оценка вектора состояния коллективного движения двух судов $\hat{s} = (\hat{r}_x, \hat{r}_y, \hat{v}, \hat{\eta}_v, \hat{w}_v)^T$, отнесённая к выбранному моменту времени t_* , который может как принадлежать интервалу наблюдения (в нашем случае $t_* = t_N$), так и лежать вне его. Описанная модель движения (2) является кинематической моделью; модели такого типа традиционны при решении задач управления движущимися объектами в условиях отсутствия информации о силах и моментах, обуславливающих движение (3).

Совокупность величин $(r_x, r_y, v, \eta_v, w_v)^T$ свидетельствует о потенциально опасном состоянии двух судов в случае выполнения следующих двух неформальных условий:

- направление вектора скорости относительного движения судов близко к направлению вектора g ;
- величина w_v близка к скорости изменения направления вектора g .

Формализация данных условий определяется, очевидно, трактовкой понятия «опасная ситуация» и здесь следует обратиться к анализу опыта практического судовождения, показывающему, что наибольшее значение для обеспечения безопасного плавания имеет

V. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗНАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

соблюдение некой «зоны безопасности» возле судна, называемой также «корабельным доменом» [4, 5, 6, 7], в которую не допускается вторжение посторонних объектов.

В настоящей работе рассматривается корабельный домен статического типа, жёстко привязанный к судну с номером m и интерпретируемый окружностью заданного радиуса R_m , что, в свою очередь, позволяет формализовать условия потенциально опасного состояния двух судов следующим образом:

$$|\eta_v - \eta_r| < \theta, \quad (4)$$

$$|w_v - w_r| < \dot{\theta} \quad (5)$$

где $|r| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$ — текущее расстояние между судами,

$\eta_r = \arctan\left(\frac{r_x}{r_y}\right)$ — азимут вектора r , $w_r = d\eta_r/dt$ — скорость

изменения азимута вектора r , $\theta = \arcsin((R_1 + R_2)/|r|)$ — угол, определяемый расстоянием между судами и размерами доменов (то есть считается, что в безопасном состоянии корабельные домены не должны «вторгаться» в область друг друга), $\dot{\theta} = d\theta/dt$ — скорость изменения данного угла, а все функции соответствующим образом доопределены для корректных вычислений углов и их разностей. Если при этом учесть, что:

$$w_r = \frac{r_x v \cos \eta_v - r_y v \sin \eta_v}{|r|^2},$$

$$\dot{\theta} = -\frac{R_1 + R_2}{|r|^2 \sqrt{1 - (R_1 + R_2)^2 / |r|^2}} \frac{d|r|}{dt},$$

$$\frac{d|r|}{dt} = -\frac{r_x v \sin \eta_v + r_y v \cos \eta_v}{|r|},$$

то условие (4) будет формализовать опасную ситуацию при равномерном и прямолинейном движении судов, условие (5) дополнять его в случае, если суда маневрируют.

Таким образом, в настоящей работе ставится задача о нахождении по измерениям z_x, z_y каждого судна оценки вектора состояния коллективного движения двух судов $\hat{s} = (\hat{r}_x, \hat{r}_y, \hat{v}, \hat{\eta}_v, \hat{w}_v)^T$, проверке условий (4), (5) и

формулировке вывода о той или иной степени опасности сложившейся навигационной ситуации.

Концепция решения

Для нахождения оценки вектора \hat{s} прибегнем к традиционному методу численного решения задач типа (3) — линеаризации с представлением в виде, характерном для задач метода наименьших квадратов (8):

$$\begin{aligned} \delta z_{rx}(t_i) = & \delta r_x(t_*) + \frac{1}{w_v} [\cos(\eta_v(t_*) + (t - t_*)w_v) - \cos(\eta_v(t_*))] \delta v + \\ & + \frac{v}{w_v} [-\sin(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v) + \sin(\eta_v(t_*))] \delta \eta_v(t_*) + \\ & + \left[-\frac{v}{w_v^2} [\cos(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v) - \cos(\eta_v(t_*))] + \right. \\ & \left. + \frac{(t_i - t_*)v}{w_v} (\sin(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v)) \right] \delta w_v + \\ & \xi_{rx}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta z_{ry}(t_i) = & \delta r_y(t_*) - \frac{1}{w_v} [\sin(\eta_v(t_*) + (t - t_*)w_v) - \sin(\eta_v(t_*))] \delta v + \\ & - \frac{v}{w_v} [\cos(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v) - \cos(\eta_v(t_*))] \delta \eta_v(t_*) + \\ & + \left[\frac{v}{w_v^2} [\sin(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v) - \sin(\eta_v(t_*))] + \right. \\ & \left. + \frac{(t_i - t_*)v}{w_v} (\cos(\eta_v(t_*) + (t_i - t_*)w_v)) \right] \delta w_v + \\ & \xi_{ry}, \quad i = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

В общем виде последнюю систему уравнений можно записать так:

$$Z = H \delta s + q, \quad (6)$$

где Z — полный вектор невязок измерений на интервале наблюдения, $\delta s = (\delta r_x, \delta r_y, \delta v, \delta \eta_v, \delta w_v)^T$ — вектор погрешностей априорных представлений о векторе s , H — матричный коэффициент, q — вектор,

описывающий немоделируемые параметры задачи (вектор приведённых погрешностей измерений).

При нахождении вектора \hat{s} необходимо учитывать, что соответствующая система линейных уравнений (6) становится вырожденной при значениях $v=0$ и/или $w_v=0$. Это приводит, во-первых, к тому что не гарантируется устойчивость сходимости итерационной процедуры оценивания типа $\hat{s}_{k+1} = \hat{s}_k + \delta_k$ для произвольных \hat{s}_0 , и, во-вторых, к невозможности правильно вычислить среднеквадратичные погрешности оценивания вектора s с помощью соответствующей дисперсионной матрицы.

Для преодоления первого ограничения достаточно организовать вычислительный процесс для нескольких различных первоначальных опорных значений \hat{s}_0 с последующим выбором корректного \hat{s} . Анализируя второе ограничение, обратим внимание, что в условиях наличия статистики \hat{s} решение рассматриваемой в работе задачи сводится, фактически, к нахождению вероятностей истинности условий (4) и (5). С учётом вида описывающих (4) и (5) функций в настоящей работе предлагается проводить проверку данных условий с помощью метода статистических испытаний, в котором вероятности интерпретируются частотой.

Указанный метод состоит в следующем:

1. Формирование «зашумлённых» векторов измерений $z_x(j)$, $z_y(j)$, так что $z_x(j) = z_x + \xi_x(j)$, $z_y(j) = z_y + \xi_y(j)$, $j = \overline{1, J}$, где $\xi_x(j)$, $\xi_y(j)$ — случайные числа, соответствующие известной статистике инструментальных погрешностей измерений.
2. Решение задачи (3) и проверка условий (4) и (5) для каждого j .
3. Нахождение частоты P_1 выпадения такого \hat{s} , что условие (4) истинно; нахождение частоты P_2 выпадения такого \hat{s} , что условие (5) истинно. Окончательно условия (4) и (5) считаются истинными, если значения P_1 , P_2 превышают некоторый порог.

Как уже было отмечено, условия (4) и (5) формализуют опасную ситуацию для судов, движение которых имеет различный характер (суда могут двигаться как прямолинейно и равномерно, так и маневрировать). Маневрирующие и неманеврирующие объекты с точки зрения рассматриваемой задачи оценки состояния безопасности коллективного движения имеют принципиальные различия. Во-первых, при внешнем наблюдении полностью достоверный прогноз траектории маневрирующего объекта невозможен. Во-вторых, с точки зрения

внешнего наблюдения для маневрирующего объекта вербальный уровень опасности заведомо ниже, чем для неманеврирующего; данное положение принимается исходя из того, что на практике маневрирование судна как правило свидетельствует о попытке судоводителя придать движению безопасный характер и о его контроле над ситуацией [5, 6].

В соответствии с этими представлениями предлагается следующая дискретная система правил соотнесения истинности условий (4) и (5) с различными уровнями опасностей (таблица 1). Так, из таблицы следует: если условия (4) и (5) истинны, то ситуация очень опасная (в таблице — правило 1); если условие (4) — ложно, а (5) — истинно, то ситуация опасная (в таблице — правило 2) и т.д.

Таблица 1

№ п/п	Условие (4)	Условие (5)	Уровень опасности
1	+	+	Очень опасная
2	-	+	Опасная
3	+	-	Почти безопасная
4	-	-	Безопасная

На практике определение по конкретным двум судам уровня «безопасная» означает, что их движение по отношению друг к другу не представляет опасности; уровня «почти безопасная» означает, что суда могут столкнуться, только если прекратят маневрирование; уровня «опасная» — если продолжат маневрирование; уровня «очень опасная» — судам необходимо начать манёвр уклонения. Таким образом, первое правило таблицы соответствует ситуации, когда возникновение опасности возможно без изменения текущих свойств движения (так называемая «красная тревога»), при реализации второго возникновение опасности может иметь место лишь при маневрировании судна («жёлтая тревога»), наконец, третье и четвёртое правило — это случаи, когда возникновение опасности при сохранении текущих свойств движения судов маловероятно [5, 6].

При внешнем наблюдении предлагаемая система правил разделения уровней опасности коллективного движения судов может рассматриваться как инструмент повышения достоверности выработки тревожных сигналов, преодоления неопределённостей, связанных с множественностью возможных управленческих решений и решения

проблемы генерации ложных тревог. При реализации её «на борту» она, наряду с этим, может использоваться как источник входных данных для выработки возможных управленческих решений системой экспертного типа (построенной, например, на представлениях нечеткой логики).

Результаты численного моделирования

Численное моделирование рассматриваемой задачи проводилось в условиях, приближенных к характерной навигационной обстановке залива Петра Великого и подтвердило ожидаемый эффект разделения уровней опасности согласно таблице 1. Приведённые ниже рисунки иллюстрируют один из фрагментов численного эксперимента.

Было принято, что информационной базой береговой СУДС является двухкоординатный радар кругового обзора с периодом обращения $3с$ и среднеквадратичными значениями погрешностей измерения дальности и азимута $\delta_r = 3 м$, $\delta_\varphi = 0.015$ град. (такие характеристики типичны для радаров типа Raytheon, установленных, например на береговых СУДС залива Петра Великого — Владивосток, Находка). Скорости движения судов задавались равными $5 м/с$, радиус корабельного домена $R_1 = R_2 = 150 м$; число измерений N , участвующих в оценке вектора s , было взято равным 20 .

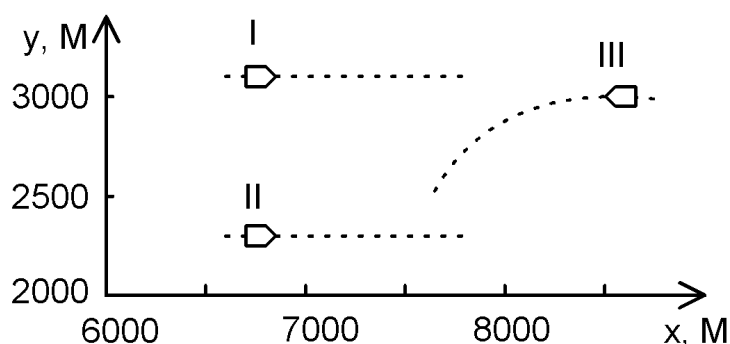


Рис. 2.

На рис. 2 изображены моделируемые траектории движения трёх судов: два из них (I и II) движутся прямолинейно и равномерно, третье (III) — маневрирует. Рис. 3 иллюстрирует работу системы по проверке по мере движения судов (с течением времени) условий (4), (5) и их соотносению с правилами таблицы 1 для «судно I — судно III» (левая колонка) и «судно II — судно III» (правая колонка). На рис. 3а и 3е представлены оцененные значения углов $|\eta_v - \eta_r|$ (сплошная линия) и θ (точки); на рис. 3б и 3ф представлены оцененные скорости изменения

углов — значения $|w_v - w_r|$ (сплошная линия) и $\dot{\theta}$ (точки); на рис. 3с и 3г показаны вычисленные по результатам 30 модельных решений значения частот P_1 и P_2 выпадения таких \hat{s} , что условия (4) и (5) являются истинными (точки и сплошные линии соответственно); на рис. 3д и 3h приведены результаты соотнесения (4) и (5) с системой правил таблицы 1.

Из последнего рисунка видно, что пороговый уровень частот P_1 и P_2 можно с большой долей уверенности принять равным 0.5 (рис 3с, 3г). Видно также, что, например, для судов I и III снижение уровня тревоги с «очень опасная» до безопасных происходит почти сразу после начала маневрирования (уклонения) судна III (рис. 3д); для судов II и III генерация уровня тревоги «опасная» также происходит заблаговременно (рис. 3h). Это свидетельствует о высокой эффективности предлагаемой системы оценки состояния безопасности как по отношению к проблеме ранней выработки тревожных сигналов, так и по отношению к проблеме генерации ложных тревог.

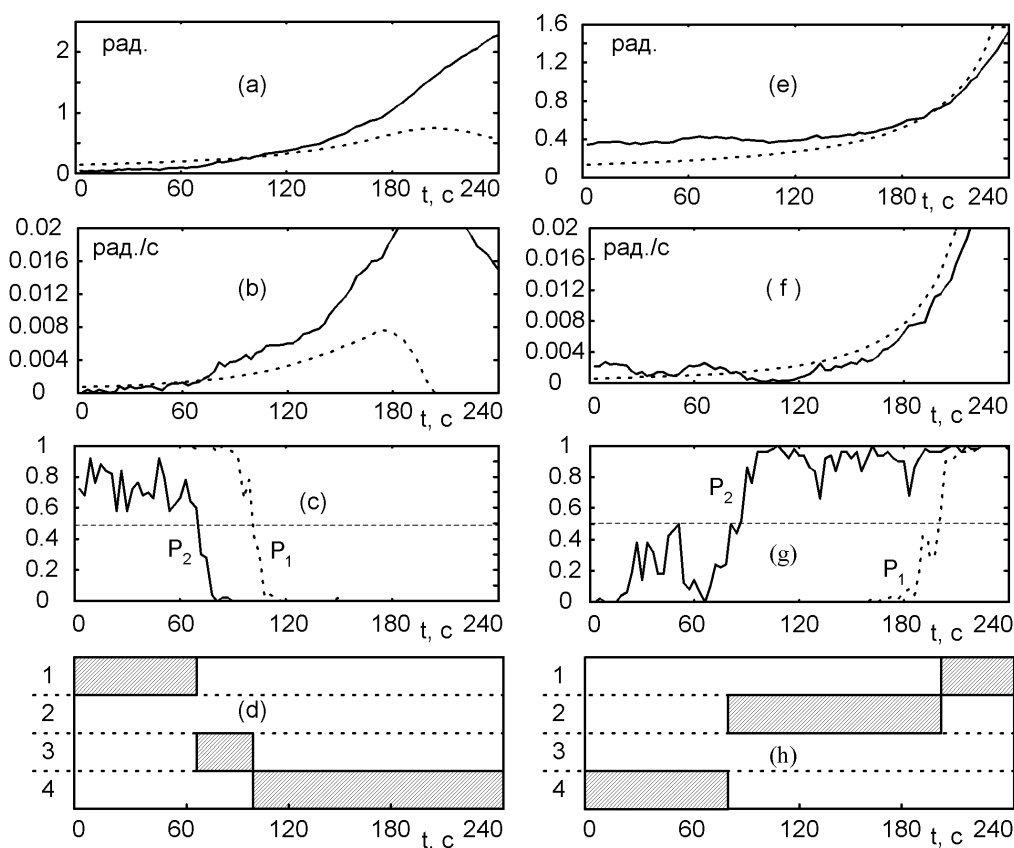


Рис. 3.

Заключение

В настоящей статье рассмотрена модель навигационной безопасности коллективного движения судов как модель безопасности «судно-судно» при внешней двухкоординатной информационной базе; проанализирована разрешимость задачи оценки состояния коллективного движения судов, предложен способ преодоления ограничений по разрешимости; предложена система правил для оценки состояния безопасности коллективного движения, основанная на проверке условий потенциально опасного состояния судов и неформальном учёте их траекторных свойств, смоделирована работа такой системы. Результаты исследования ориентированы на расширение функциональных возможностей современных систем управления движением судов.

1. Wilson P.A., Harris C.J., Hong X. A Line Of Sign Counteraction Navigation Algorithm For Ship Encounter Collision Avoidance // J.Navigation. 2003. V. 56.
2. Чуркин В. И. Оптимальное управление расхождением судов // Изв. АН. ТиСУ. 1999. №2.
3. Девятисильный А.С., Крыжко И.Б. Стабилизация движения беспилотного объекта по программной траектории // Изв. АН. ТиСУ. 1995. №4.
4. Lamb W.G. Calculation of the Geometry of Ship Collision Zones //J. Navigation. 1989. V. 42.
5. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Информационно-технологические аспекты обеспечения безопасности движения на морских акваториях // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 2003. №7.
6. Гриняк В.М, Дорожко В.М., Лоскутов Н.В., Кириченко О.В. Модели обеспечения безопасности на морских акваториях в условиях высокой интенсивности движения // НТИ. Сер. 2. Информ. процессы и системы. 2004. №9.
7. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Прогнозирование опасных ситуаций при управлении движением на море // Изв. РАН. ТиСУ. 2004. №3.
8. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. М.: Наука. 1986.