

УДК 656.61.052

DOI: 10.31653/2306-5761.32.2021.18-25

METHOD OF DISPLAYING THE RESULTS OF TRIAL PLAN FOR COLLISION AVOIDANCE

СПОСІБ ВІДОБРАЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОГРАВАННЯ ПЛАНУ РОЗХОДЖЕННЯ

L. L. Vagushchenko, DSc, professor, **A. J. Kozachenko**, senior lecturer

Л. Л. Вагущенко, д.т.н., професор, **О. Ю. Козаченко**, ст. викладач

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська Морська Академія», Україна

ABSTRACT

A method of displaying the results of trial plan for collision avoidance is proposed. It is considered that in general form this plan can be represented by segments of its own ship movement with a constant velocity vector, and sections of this vector change. The basic requirements for displaying trial plan results are formulated.

It is accepted that the domains of danger, which are used in solving the tasks to avoid collision are formed at the target and are convex shapes which are symmetrical about the target course line. These domains can be smooth closed curves or closed broken lines (polygons). A program for simulating the execution of an anti-collision plan is proposed to obtain data on this process. It is noted that the risk of passing the target is the greatest one at the moment when the shortest distance between its domain and own ship is small. The vessels' positions, special point and closest to own ship point of the domain up to this moment are considered to be displayed as trial data. Such data along the own ship path to avoid collision are called informational marks. They represent the demanding attention areas, and allow making the reasonable conclusion on acceptability of anti-collision plan. Algorithms for calculating elements of informational marks, when using elliptical and polygonal danger domains for targets, are determined.

To test the procedure of simulating the implementation of the evading plan and the proposed method of displaying information, a special program was compiled in the Borland Delphi language. This program was used to test the plans to avoid collision in many collision situations applying various forms of targets danger domains. The display of testing results for two segments of the evading plan in a situation with six targets, using circular danger domains with a center shifted towards the nose from the center of the target mass, is presented. Target and own ship dimensions are included in the size of each domain.

Key words: collision avoidance, trial maneuvers, domain of danger, informational mark.

РЕФЕРАТ

Пропонується метод відображення результатів програвання планів власного судна для уникнення зіткнень. Вважається, що в загальному вигляді цей план може бути представлений відрізками руху з постійним вектором швидкості і ділянками його зміни. Сформульовано основні вимоги до відображення результатів програвання.

Прийнято, що домени небезпеки, які використовуються при вирішенні завдань розходження, утворюються у цілей і є опуклими фігурами, симетричними щодо лінії курсу цілі. Ці домени можуть бути гладкими замкнутими кривими, або замкнутими ламаними лініями (полігонами). Запропоновано програму імітації виконання плану розходження для отримання даних про цей процес. Відзначено, що ризик проходження цілі найбільший в момент, коли найкоротша відстань між її доменом і власним судном мала. Даними програвання, що підлягають відображенню, вважаються в роботі відповідні цим моментам

положення суден, особливої і найближчій до власного судну точок домену. Сукупності таких даних уздовж шляху власного судна для уникнення зіткнення, названі інформаційними відмітками, представляють на цьому шляху ділянки, що потребують уваги, і дозволяють зробити обґрунтований висновок про прийнятність плану розходження. Визначено алгоритми розрахунку елементів інформаційних позначок при використанні у цілей еліптичних і полігональних доменів небезпеки.

Для перевірки процедури імітації виконання плану розходження і запропонованого методу відображення інформації була складена спеціальна програма на мові «Borland Delphi». За цією програмою проведені програвання планів розходження і відображення їх результатів у багатьох колізійних ситуаціях з використанням у цілей доменів небезпеки різної форми. Наведено відображення таких результатів для двох відрізків плану розходження в ситуації з шістьма цілями при використанні кругових доменів небезпеки зі зміщенням в сторону носа від центру маси цілей центром. У кожному домені враховані розміри відповідної йому цілі і власного судна.

Ключові слова: уникнення зіткнень, програвання маневрів, домени небезпеки, інформаційні позначки.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Из-за серьезных потенциальных человеческих, экологических и экономических последствий столкновений на море их предотвращение стало важной проблемой в мореплавании. Несмотря на то, что в последние годы были предложены различные методы, модели и процедуры для повышения эффективности разрешения коллизионных ситуаций, эта проблема остается актуальной.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и выделение нерешенных вопросов

В статье [3] представлен всеобъемлющий обзор методов предотвращения столкновений, охватывающих прогнозирование движения, обнаружение риска чрезмерного сближения и разрешения коллизионных ситуаций. Обсуждаются сильные и слабые стороны этих методов. В работе [2] анализируются модели, методы и технологии, предложенные для решения проблемы планирования пути для избежания столкновения с судами. В ней также приведен список литературы по этому вопросу, основанный на тщательном анализе существующих работ в этой области. Основное внимание в статьях [2, 3] уделено особенностям методов, предложенных для определения маневров расхождения с несколькими судами. Вопросы облегчения оператору быстрой оценки эффективности получаемых с помощью этих методов результатов не затрагиваются. Довольно много работ, в частности [4, 5, 6], посвящены разработанным на разных подходах алгоритмам для компьютерного определения стратегий расхождения. Бортовая система поддержки предупреждений столкновений должна быть способной не только рекомендовать действия для расхождения, но и обосновывать их. Составной частью такого обоснования является проигрывание рекомендуемой стратегии. Этому вопросу, например, посвящена статья [7]. В ней в основу такого обоснования положены уже используемые в бортовых системах предупреждения столкновений способы проигрывания маневров, недостатки которых приведены ниже. Для установления приемлемости и своевременности выбираемого маневра расхождения ИМО требует (резолюция MSC. 192(79)) иметь в судовом радиолокационном оборудовании судов 10000 gt. и более функцию проигрывания маневра (Trial Maneuver). В этой резолюции, по сути, ограничений на методы проигрывания маневров нет. В различных моделях РЛС применяются разные способы имитации маневров [1]. Её результаты обычно представляются либо ситуацией на момент окончания маневра (в статике), либо в ускоренном в 10-60 раз масштабе времени (в динамике). Недостатком первого варианта является отсутствие данных об

особенностях протекания маневра. Динамическая имитация уменьшает время на принятие решений. При таком проигрывании положение судов быстро меняется, и трудно заострить внимание на важных моментах в этом процессе для его оценки. Анализ литературы, посвященной проблеме предотвращения столкновений судов, показывает, что вопросам обоснования действий для расхождения и повышению уровня понимания судоводителем степени эффективности выбираемого им или рекомендуемого системой плана расхождения уделено пока недостаточно внимания.

Формулировка целей исследования (постановка задачи)

Целью работы является разработка метода для наглядного отображения проблемных участков результатов проигрывания плана расхождения с судами.

Освещение результатов работы

В тексте статьи собственное судно обозначено OS (own ship); судно-цель - TS (target ship); образуемый у цели домен опасности - TDD (target's domain of danger); цель с номером J и ее домен - TS_J и TDD_J ; положение OS в момент кратчайшего сближения с объектом – CPA (closest point of approach), расстояние кратчайшего сближения и время до него – DCPA, TCPA (distance at CPA и time to CPA); K, V и K_j, V_j – курс, линейная скорость OS и TS_J ; k_j, v_j – курс, линейная скорость TS_J относительно OS.

В общем виде план расхождения может быть представлен несколькими отрезками движения OS с постоянными векторами скорости, и между ними участками изменения этих векторов, которые по длине значительно меньше отрезков первого вида. Проигрывание этого плана направлено на получение информации, позволяющей убедиться в его эффективности, обратить внимание на важные моменты в процессе его будущего выполнения, выявить недостатки. В работе проигрывание плана расхождения проводилось имитацией его выполнения путем последовательного расчета координат OS и целей, расстояний между этими судами и других элементов через малый интервал времени от начального момента до момента завершения. На современных компьютерах время такой имитации не превышает одной секунды.

Отображение результатов проигрывания намечаемого плана расхождения должно быть:

- оперативным (без запаздывания), чтобы время на оценку плана и принятие решения не сокращалось;
- наглядным, т.е. четким, ясным, не загроможденным второстепенными деталями, важная информация должна выделяться;
- полным, т.е. позволять обоснованно судить о качестве плана;
- адекватным, т.е. отражать существенные стороны выполнения плана с требуемой точностью.

При решении задач расхождения, как правило, с судами связывают области (домены) опасности. Ниже считается, что они образуются у целей. При исследовании проблемы предупреждения столкновений судов использовались различные виды доменов [8]. При выборе их формы и величины в ряде работ были учтены особенности района плавания, размеры OS и TS, соотношение их скоростей, увеличение опасности столкновения при нахождении объектов на носовых курсовых углах, элементы МППСС. В большинстве случаев применялись простые по форме домены, чтобы решение задач расхождения значительно не усложнялось. Ниже принято, что TDD являются выпуклыми фигурами, симметричными относительно линии курса TS, и представляют собой либо гладкие замкнутые кривые, либо замкнутые ломаные линии (полигоны). Представители таких доменов приведены на рис. 1. Кроме центра массы (ЦМ) цели в доменах на линии курса будет выделяться точка (μ), названная особой. Она лежит напротив точки касания границы TDD прямой линией, параллельной линии курса (см. рис. 1 *a, b, e*). В рассматриваемых ниже доменах особая точка находится впереди ЦМ цели (рис. 1 *a*) или в этом центре (рис. 1 *b*). Если в границе TDD есть

отрезки, параллельные линии курса, то особая точка берется впереди от ЦМ TS на проекции этого отрезка на линию курса (см. рис. 1 *c, d*).

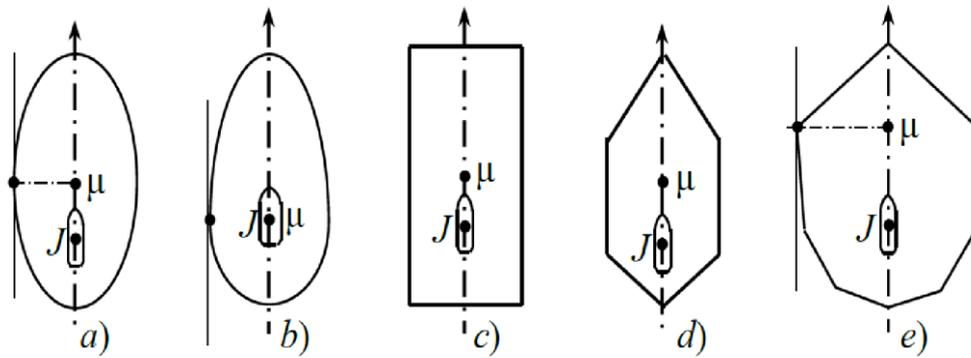


Рис. 1. Представители доменов опасности
 J, μ – обозначения ЦМ цели TS_J и особой точки ее домена

При оценке плана расхождения, помимо соответствия МППСС, интерес представляют следующие вопросы:

- значительным или нет, будет минимальное расстояние между OS и доменом каждой цели в процессе выполнения плана;
- если это расстояние окажется небольшим, то на каких курсовых углах в его момент будет находиться ближайшая к OS точка TDD и сама цель;
- когда, до момента кратчайшего сближения OS с TDD либо после него, линии курса OS и цели пересекутся, и по носу или по корме пересечет OS курс цели.

Для получения быстрого ответа на эти вопросы по отображению результатов проигрывания на планируемой траектории OS предлагается показывать информационные отметки (IM - informational mark), экономно представляющие интересующие данные. Такую отметку для цели TS_J обозначим IM_J . В нее включим (рис. 2) рассчитываемые на момент кратчайшего сближения OS с TDD_J следующие элементы: точки (j°, J^*) местоположений OS и TS_J , точки (p^*, μ^*) TDD - ближайшую к OS и особую, соединяющие μ^* с J^* и p^* отрезки. По этой метке легко оценить величину кратчайшего расстояния между OS и доменом, курсовые углы ближайшей к OS точки домена и места цели. Если угол между отрезками метки прямой, то суда разойдутся на параллельных курсах; если тупой, то OS пересекает курс TS_J по носу; если острый – то по корме. Это также можно определить, рассматривая, до или за линией курса OS находится точка J^* . Показываться IM_J будет, когда расстояние $j^\circ p^*$ не превышает определенной величины.

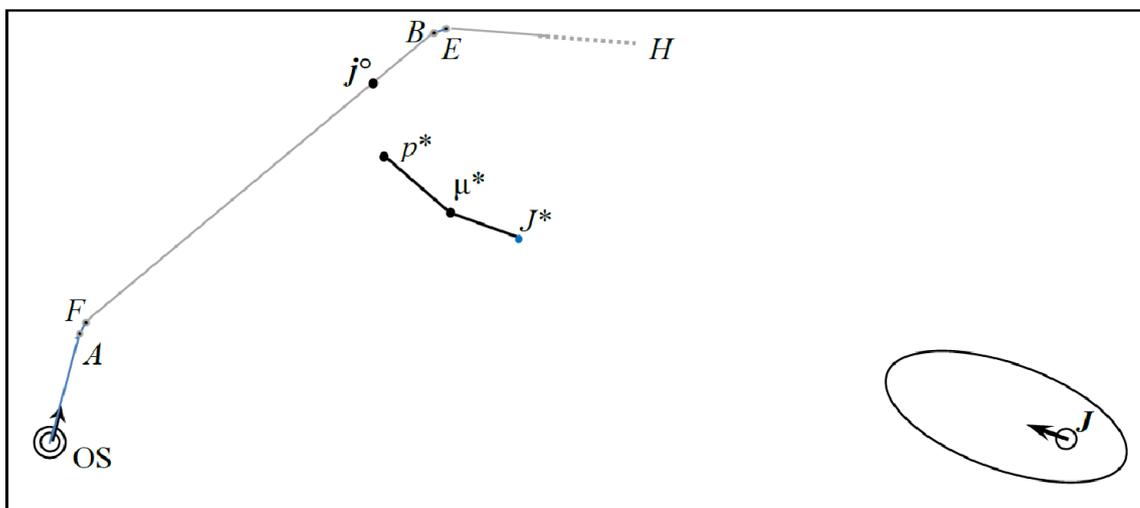


Рис. 2. Часть планируемой OS для расхождения с TS_J траектории с информационной отметкой

Представим принцип получения ИМ при использовании эллиптических и полигональных доменов опасности, рассматривая ситуацию, приведенную на рис. 2, где показаны: начальные положения OS и TS_J, часть выбранной OS для расхождения траектории, ее начало (A), участки прямолинейного равномерного движения (FB, EH) и маневрирования (AF, BE).

Используем при решении две прямоугольные системы координат XY и ξζ. Начало первой из них свяжем с точкой земной поверхности, ось OY направим на север, а ось OX – на восток. Эта система обычно применяется для представления координат судов и других объектов в районе плавания при решении задач расхождения. При известных K, V и K_J, V_J, курс и линейная скорость TS_J относительно OS находятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} v_{jX} &= V \cdot \sin K - V_J \cdot \sin K_J \\ v_{jY} &= V \cdot \cos K - V_J \cdot \cos K_J \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} v_j &= \sqrt{v_{jX}^2 + v_{jY}^2} \\ k_j &= \arcsin(v_{jX}/v_j) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Начало второй системы (ξζ) свяжем с особой точкой μ домена цели TS_J, ось μζ направим по вектору скорости TS_J, а ось μξ – вправо от нее.

Для эллиптического домена будем считать, что ЦМ TS_J находится в фокусе эллипса. При известных полуосях (a, b) этого домена, координатах X_J, Y_J и курсе K_J цели TS_J, найти координаты X_{μJ}, Y_{μJ} центра ее домена не составляет труда.

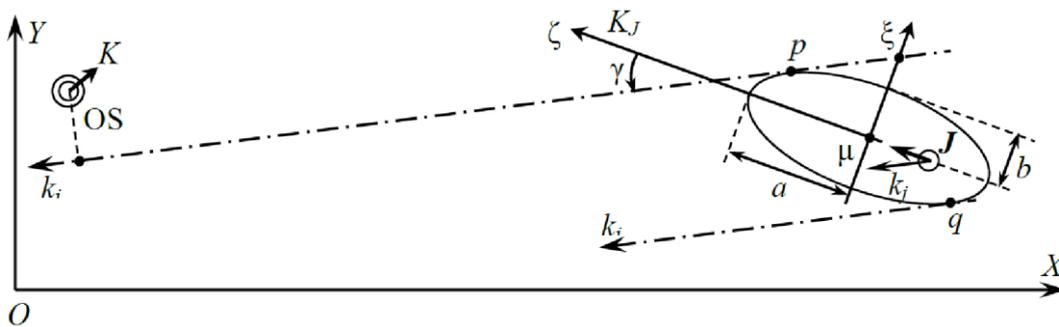


Рис. 3. К расчету положения OS на момент кратчайшего сближения с эллиптическим TDD_J на участке FB

Рассмотрим движение TDD_J относительно OS на участке FB в выбранной ситуации, представив положения судов на момент нахождения OS в точке F (рис. 3). Координаты OS и TS_J на этот момент обозначим X_F, Y_F и X_{JF}, Y_{JF}. При перемещении относительно OS домен выметает полосу, границами которой являются линии относительного курса k_j, касательные к границе домена. Для нахождения координат точек p и q касания, рассмотрим описывающую эллипс функцию и ее производную в системе ξζ

$$\zeta = \frac{a}{b}(b^2 - \xi^2)^{\frac{1}{2}}; \quad \zeta' = c_\delta = -\frac{a}{b}\xi(b^2 - \xi^2)^{-\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Учитывая, что $c_\delta = \tan \tan(0,5\pi - \gamma)$ известно ($\gamma = K_J - k_j$), из выражения производной получим уравнение и формулу для нахождения координаты ξ_p, ξ_q точек p и q:

$$(a^2 + c_\delta^2 \cdot b^2) \cdot \xi^2 = c_\delta^2 \cdot b^4; \quad \xi_{p,q} = \pm c_\delta b^2 / \sqrt{a^2 + c_\delta^2 \cdot b^2}. \quad (3)$$

Подставив ξ_p, ξ_q в уравнение эллипса, рассчитаем координаты ζ_p, ζ_q этих точек. Затем координаты точек p и q представим в системе XY, и обозначим их X_p, Y_p и X_q, Y_q.

Для получения элементов ИМ_J выполнялись следующие операции. Находилась ближайшая к OS граница полосы, выметаемой доменом при движении относительно OS. Для этого рассчитывались ДСРА (δ_p, δ_q), ТСПА (τ_p, τ_q) точек p и q при прохождении домена

относительно OS по формулам, которые приведем только для точки p , так как для точки q они аналогичны

$$\left. \begin{aligned} \Delta_X &= X_F - X_p \\ \Delta_Y &= Y_F - Y_p \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} \delta_p &= (-\Delta_X \cdot v_{jY} + \Delta_Y \cdot v_{jX}) / v_j \\ \tau_p &= (-\Delta_X \cdot v_{jX} + \Delta_Y \cdot v_{jY}) / v_j^2 \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

В рассматриваемой ситуации ближайшей к OS является граница, проходящая через точку p . Найдем координаты X_δ и Y_δ , $X_{j\delta}$ и $Y_{j\delta}$, $X_{p\delta}$ и $Y_{p\delta}$, $X_{\mu\delta}$ и $Y_{\mu\delta}$ положений J° , J^* , p^* , μ^* (рис. 1) соответственно OS, TS_j , точек p и μ на момент кратчайшего сближения OS с доменом:

$$\left. \begin{aligned} X_\delta &= X_F + V \cdot \tau_p \cdot \sin K \\ Y_\delta &= Y_F + V \cdot \tau_p \cdot \cos K \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} X_{j\delta} &= X_{jF} + V_j \cdot \tau_p \cdot \sin K_j \\ Y_{j\delta} &= Y_{jF} + V_j \cdot \tau_p \cdot \cos K_j \end{aligned} \right\}; \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} X_{p\delta} &= X_p + V_j \cdot \tau_p \cdot \sin K_j \\ Y_{p\delta} &= Y_p + V_j \cdot \tau_p \cdot \cos K_j \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} X_{\mu\delta} &= X_{j\delta} + \sigma \cdot \sin K_j \\ Y_{\mu\delta} &= Y_{j\delta} + \sigma \cdot \cos K_j \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

В результате, будут найдены все элементы, необходимые для отображения информационной отметки для цели TS_j на электронной карте.

Особенности получения IM_j при использовании полигонального домена рассмотрим на примере его шестиугольного варианта. Вначале путем расчета расстояний от ЦМ TS_j до линий относительного курса k_j , проходящих через вершины домена, найдем две вершины, определяющие границы полосы, выметаемой доменом при его движении относительно OS (рис. 4). Эти две точки обозначим p и q . Дальнейшее получение элементов IM_j аналогично их нахождению в ситуации с эллиптическим доменом.

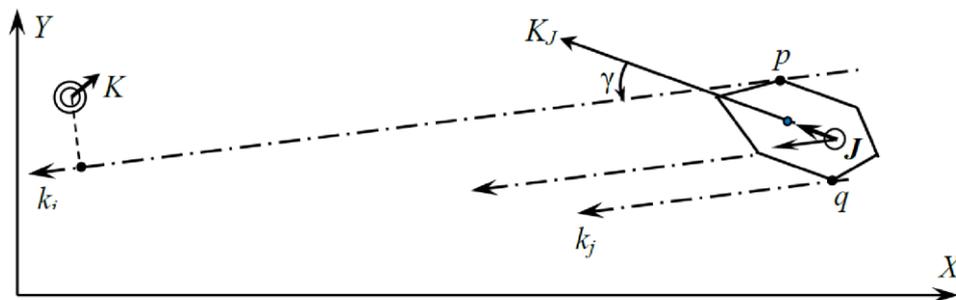


Рис. 4. Представление движения шестиугольного TDD_j относительно OS для участка FB

Для проверки процедуры имитации выполнения плана расхождения и предлагаемого метода отображения информации была составлена программа на языке «Vorland Delphi». По этой программе проведены проигрывания намечаемых во многих коллизионных ситуациях планов расхождения с использованием у целей доменов опасности различной формы. Ниже приведено отображение результата проигрывания плана расхождения OS с шестью целями, у которых использованы круговые домены опасности со смещенным центром относительно ЦМ цели (Рис. 5). Параметры движения этих судов и расположения целей относительно OS приведены в табл. 1, где L – длина судна; Π , D – пеленг цели и дистанция до нее, номер 0 присвоен OS. В каждом домене учтены размеры соответствующей ему цели и OS. Расстояние от OS до начала уклонения от первоначальной линии курса равно 14 кб. Изменять скорость в плане расхождения не намечалось.

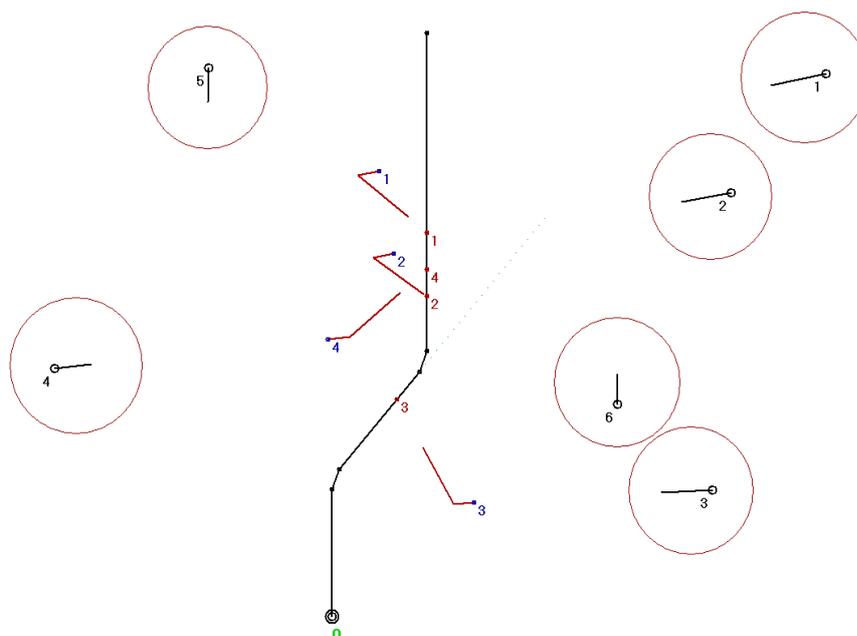


Рис. 5. Отображение результатов проигрывания плана расхождения в ситуации с шестью целями

Таблица 1. Параметры взаимного расположения и сближения судов

№ судна	L, m	K^0	$V, уз.$	Π^0	D, NM
0	220	0	17,0	-	-
1	250	258	19,1	43	8,17
2	140	260	16,9	44	6,48
3	175	267	17,3	72	4,51
4	330	84	12,6	311	4,16
5	80	182	11,5	347	6,20
6	210	1	9,7	54	3,98

Выводы

Приведенный способ отображения результатов проигрывания плана расхождения позволяет сделать обоснованное заключение о его приемлемости для реализации. Этот способ может быть использован в бортовых системах предупреждения столкновений при выборе действий для уклонения от столкновения оператором и при коррекции рекомендуемых системой маневров расхождения. Он не требует использования специального режима проигрывания маневров, так как достаточным является наложение траектории планируемого маневра и информационных отметок на прокладку пути OS на электронной навигационной карте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Песков Ю. А. Практическое пособие по использованию САПП / Ю. А. Песков - М.: Транспорт, 1995. - 224 с.
2. Fışkın R, A research on techniques, models and methods proposed for ship collisions avoidance path planning problem / R .Fışkın, H. Kisi, E. Nasibov //The International Journal of Maritime Engineering. - 160(A2). – 2018. – pp. 187-206.

3. Huang Y. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art / Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R.R. Negenborn, P.H.A.J.M. van Gelder // Safety Science. -121. - 2020. - pp. 451–473.
4. Hirayama K. DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed /K. Hirayama, K. Miyake, T. Shiota, T. Okimoto //TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, - 13 (1). - 2019. - pp. 117-123.
5. Koszelew J. Beam Search Algorithm for Anti-Collision Trajectory Planning for Many-to-Many Encounter Situations with Autonomous Surface Vehicles /J. Koszelew, J. Karbowska-Chilinska, K. Ostrowski, P. Kuczynski, E. Kulbiej, P. Wołajsza // Sensors, 20, 4115. - 2020, - pp. 1-17.
6. Naeem W. A Reactive COLREGs-Compliant Navigation Strategy for Autonomous Maritime Navigation / W. Naeem, S.C. Henrique, L. Hu //10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. - Trondheim, Norway. - 2016. - 207-213.
7. Sharath L Naik. Prudent Ship Pilotage Using Trial Maneuver / Sharath L Naik, Vimarshini K.R. // 9th International Radar Symposium, NIMHANS Convention Centre, Bangalore, India – 2013. p. 1-5.
8. Szlapczynski R. Review of ship safety domains: Models and applications. / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska //Ocean Engineering. - 145, - 2017. - pp. 277–289,

REFERENCES

1. Peskov J.A. (1995). Prakticheskoe posobie po ispolzovaniju SARP. M. Transport: 224.
2. Fişkin, R, Kisi, H, Nasibov, E. (2018). A research on techniques, models and methods proposed for ship collisions avoidance path planning problem / The International Journal of Maritime Engineering. 160(A2): 187-206.
3. Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R.R., van Gelder P.H.A.J.M. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. Safety Science. 121. 451–473.
4. Hirayama K., Miyake K., Shiota T., Okimoto T. (2019). DSSA+: Distributed Collision Avoidance Algorithm in an Environment where Both Course and Speed Changes are Allowed /TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 13, No. 1: 117-123.
5. Koszelew J., Karbowska-Chilinska J., Ostrowski K., Kuczynski P., Kulbiej E., Wołajsza P. (2020). Beam Search Algorithm for Anti-Collision Trajectory Planning for Many-to-Many Encounter Situations with Autonomous Surface Vehicles / Sensors, 20, 4115: 1-17.
6. Naeem W, Henrique S C., Hu L. (2016). A Reactive COLREGs-Compliant Navigation Strategy for Autonomous Maritime Navigation /10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems: Trondheim, Norway: 207-213.
7. Sharath L Naik. Vimarshini K.R. (2013). Prudent Ship Pilotage Using Trial Maneuver /9th International Radar Symposium, NIMHANS Convention Centre, Bangalore, India: 1-5.
8. Szlapczynski, R. & Szlapczynska, J. (2017). Review of ship safety domains: Models and applications. Ocean Engineering 145: 277–289.