

METHOD FOR CALCULATING THE POSITIONS OF SPECIFIC POINTS ON THE MULTIFOCAL SHIP'S DOMAIN

A. A. Mironenko

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The concept of approximating of a ship's domain on the ground of the continuous deformable media is considered as a continuous set of points of the multifocal ellipse. It is also applicable in the navigational hazards clearing problem. The configuration of the multifocal ellipse ship's domain allows to present more accurately the information of the various kinematic and dynamic parameters of the vessel's motion and generate the control actions to ensure safety of navigation. If ship's domain is formalized as the multifocal ellipse safety of navigation requires the development of the principles of control actions on the kinematic level. The non-trivial problem of determining the positions of the special points on the ship's domain: the closest point on the ship's domain to the navigational hazard, intersection point with the relative motion line, and the "extreme" points arises. Due to the nonlinearity of the multifocal ellipse equation, variations of the size and shape of the ship's domain caused by the ship's movement and the current navigation situation, the represented results are grounded on the classical navigational position fix method — the generalized method of the position lines. The general provisions of the research are supported by the infographics and are brought to practical application. The formalization of the proposed methods in the automatic navigation or in autonomous ship's control systems will enable the navigator on board or operating the vessel remotely to solve the various navigation problems on a new level and in interconnection with traditional methods of safety of navigation monitoring.

Keywords: ship's domain, multifocal ellipse, position line, relative motion line, specific points.

For citation:

Mironenko, Aleksandr A. "Method for calculating the positions of specific points on the multifocal ship's domain." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 319–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-319-330.

УДК 656.61.052.4

МЕТОД РАСЧЕТА КООРДИНАТ ХАРАКТЕРНЫХ ТОЧЕК N-ФОКУСНОЙ ЗОНЫ НАВИГАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

А. А. МIRONENKO

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена концепция аппроксимации геометрической формы зоны навигационной безопасности судна в идеологии образов сплошных деформируемых сред как непрерывное множество точек N-фокусного эллипса, который также можно использовать применительно к задаче ограждения навигационных опасностей. Данная конфигурация позволяет точнее учитывать информацию о полях различных кинематических и динамических параметрах движения судна и генерировать управляющие воздействия по обеспечению заданного уровня безопасности плавания. Отмечается, что решение задачи обеспечения безопасности судовождения при формализации зоны навигационной безопасности судна в виде N-фокусного эллипса первоначально требует разработки принципов управления на кинематическом уровне. При этом возникает нетривиальная задача определения координат особых «характерных» точек на границе зоны навигационной безопасности, таких как точка, ближайшая к навигационной опасности, находящаяся на пересечении с линией относительного движения, «крайние» точки. В том числе из-за нелинейности уравнения N-фокусного эллипса, изменений размеров и формы зоны навигационной безопасности, вызванных движением собственного судна и меняющейся навигационной обстановки, предлагается решение, базирующееся на одном из классических методов определения местоположения в навигации — обобщенном методе линий положения. Основные положения изыскания подкреплены инфографикой и доведены до уровня

непосредственного практического применения. Сделан вывод о том, что формализация предлагаемых методов и алгоритмов в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту или управляющему ими дистанционно решать задачи судовождения на качественно новом уровне в неразрывной связи с традиционными методами контроля безопасности мореплавания.

Ключевые слова: зона навигационной безопасности, зона навигационной безопасности, многофокусный эллипс, линия положения, линия относительного движения характерные точки.

Для цитирования:

Мироненко А. А. Метод расчета координат характерных точек *N*-фокусной зоны навигационной безопасности / А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 319–330. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-319-330. — EDN DCODQX.

Введение (Introduction)

В соответствии с требованиями и рекомендациями международных морских нормативных документов: SOLAS-74, STSW-78, A.893(21), важнейшей задачей судоходных компаний является обеспечение безопасности судовождения, которая может быть достигнута при соблюдении комплекса мер, выполняемых судоводительским персоналом. Комплекс мер предусматривает обязательное изучение района плавания, анализ опыта предыдущих переходов и последующее планирование программной траектории (ПТ) судна с гарантированной полосой проводки (ГПП) и режимами движения на навигационной карте [1]. В пределах ГПП по ПТ должны быть учтены все известные навигационные опасности (НО) и обеспечено достаточное пространство для маневров. В ходе рейса оперативно осуществляется непрерывный контроль путем сопоставления текущих координат местоположения (географических и / или полярных) и параметров движения от запланированных. Очевидно, что при этом необходим непрерывный анализ отсутствия НО как статических: опасных глубин, изобат, средств навигационного оборудования (СНО), нефтяных вышек, буровых платформ и др., так и динамических: судов, кораблей и др., в пределах некоторого водного пространства вокруг судна, обеспечивающего безопасное плавание, причем в практике судовождения эта задача сводится к решению на плоскости и под такого рода пространством принято понимать зону навигационной безопасности (ЗНБ) судна.

В зарубежных и отечественных исследованиях [2]–[16] рассматриваются разнообразные математические модели (концепции) зоны навигационной безопасности (ЗНБ), предложенные на разных исторических этапах развития методов судовождения. Например, в [4] исследуется модель круговой и эллиптической формы. Автор исследования [5] предлагает формирование ЗНБ по известным (обсервованным) координатам двух разнесенных точек судна. Оригинальность исследования [6] заключается в динамическом изменении ЗНБ эллиптической формы под маршрут движения судна, а статья [9] относится к практике применения Правил МППСС-72 для ЗНБ эллиптической формы. Сравнительному обзору основных этапов развития моделей ЗНБ посвящены работы [7], [13]. Оригинальные концепции ЗНБ полигональной формы и комплексной ЗНБ эллиптической формы предложены авторами, соответственно, исследований [8] и [10]. Исследования, проведенные зарубежными учеными [11], [12], [14]–[16], подтверждают состоятельность концепции ЗНБ эллиптической формы на основе анализа экспериментальных данных об элементах движения судов в стесненных условиях плавания.

Применению моделей ЗНБ для решения актуальной проблемы расхождения судов в море посвящены работы [17] – [22]. Например, в [17] предлагается решение методами теории нечетких множеств, в [18], с учетом реалий развития средств навигации, под маршрутом движения судна понимается программная траектория (ПТ), а задача расхождения судов решается на графе. Авторы исследования [19] задачу расхождения судов предлагают решать на основе использования идеологии «машины Дубинса», т. е. заданием кривой поворота дугами окружностей, а исследователи [20] предлагают решать данную задачу на основе концепции ЗНБ прямоугольной формы. В исследовании [21] предлагается учитывать погрешности определения места судна (ОМС) в общем случае

радиальной. Автор исследования [23] подвергает анализу различные модели ЗНБ и поднимает вопрос оценки размеров зоны допустимого сближения судов при различных навигационных ситуациях.

В исследовании [1] предлагается обобщение концепций геометрических форм: *окружность – эллипс – многофокусные кривые*, предназначенных для аппроксимации границ НО с «привязкой» к изолиниям навигационных параметров, в зависимости от сложности, возможностей бортовых технических средств судовождения (ТСС) и условий плавания. В исследовании авторов [3] метод адаптирован для формализации контура ЗНБ в идеологии сплошных деформируемых сред в виде непрерывного многообразия точек N -фокусного эллипса, изменяющегося в зависимости от условий плавания.

Целью настоящего исследования является разработка обобщенного алгоритма для нахождения особых «характерных» точек на границе ЗНБ, в частности ближайшей к НО, расположенной на пересечении ЗНБ с линией относительного движения (ЛОД) цели, «крайних» точек на ЗНБ для анализа риска столкновения и действий по безопасному расхождению.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В общем виде принципы формализации модели N -фокусного эллипса, аппроксимирующего ЗНБ, рассмотрены в работе [3]. Первоначально аппроксимируются геометрические размеры судна в виде ЗНБ прямоугольной формы, затем вводится эллиптическая ЗНБ, учитывающая в том числе радиальную среднюю квадратическую погрешность (СКП) координат обсервованного места судна (ОМС) — рис. 1:

$$\begin{aligned} a &= (L + M_o) / \sqrt{2} ; \\ b &= (B + M_o) / \sqrt{2} ; \\ c &= \sqrt{a^2 - b^2} , \end{aligned} \quad (1)$$

где L, B — наибольшие длина и ширина судна;

M_o — радиальная СКП координат ОМС;

a, b — соответственно большая и малая полуоси эллиптической ЗНБ;

c — фокальное расстояние.

Первоначально геометрические размеры судна и радиальная СКП координат ОМС аппроксимируются ЗНБ прямоугольной формы относительно центральной линии ДП судна в прямоугольной системе координат, затем по размерам ЗНБ прямоугольной формы рассчитываются параметры эллиптической ЗНБ.

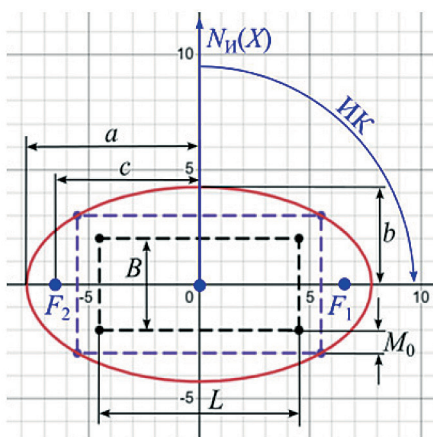


Рис. 1. Построение двухфокусного эллипса по размерам ЗНБ прямоугольной формы:

O — центр системы координат, судна, прямоугольной и эллиптической ЗНБ;

F_1, F_2 — фокусы двухфокусного эллипса ЗНБ; ИК — истинный курс

В контексте исследования [3] эти фокусы принимаются за «неподвижные» (связанные с текущей позицией судна), а их координаты в зависимости от текущего ИК судна определяются через проекции фокальных расстояний (1) на координатные оси:

$$\begin{aligned}x_{F1} &= x_0 + x_c; & y_{F1} &= y_0 + y_c; \\x_{F2} &= x_0 - x_c; & y_{F2} &= y_0 - y_c; \\x_c &= c \cos \text{ИК}; & y_c &= c \sin \text{ИК},\end{aligned}\quad (2)$$

где x_c, y_c — проекции фокальных расстояний на координатные оси;

$(x_{F1}, y_{F1}), (x_{F2}, y_{F2})$ — прямоугольные координаты первого (F_1) и второго (F_2) фокусов относительно центра судна.

Связанный с текущей позицией двухфокусный эллипс ЗНБ при этом учитывает геометрические составляющие (размеры судна) и СКП определения координат местоположения ТСС, а также является исходным в концепции формализации модели ЗНБ в виде N -фокусного эллипса [3].

Дополнительно в зависимости от условий плавания, сложности решаемых задач, требуемой точности аппроксимации контура ЗНБ судна в рамках концепции, разработанной в исследовании [2] и, в зависимости от технических характеристик / возможностей ТСС определяются количество и позиции «подвижных» фокусов, что непосредственно влияет на форму и размеры N -фокусного эллипса. Например, в работе [3] предлагаются следующие выражения для расчета координат третьего «подвижного» фокуса трехфокусного эллипса ЗНБ:

$$\begin{aligned}x_{F3} &= x_0 + (V + m_v) \cos \text{ПУ} \Delta t; \\y_{F3} &= y_0 + (V + m_v) \sin \text{ПУ} \Delta t,\end{aligned}\quad (3)$$

где V — скорость судна относительно грунта;

m_v — СКП скорости относительно грунта;

Δt — период прогноза.

Обобщенная математическая модель N -фокусного эллипса, аппроксимирующего ЗНБ в работе [3], конструируется по текущим значениям вектора движения судна относительно грунта с учетом СКП их измерения:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^N \sqrt{(x - x_{F_i})^2 + (y - y_{F_i})^2} &= a_N; \\a_N &= Na + (N - 2)(V + m_v) \Delta t + \frac{m_{\text{ПУ}}}{(V + m_v) \Delta t} \text{ при } V \neq 0; \\a_N &= Na + (N - 2)m_v \Delta t \text{ при } V = 0,\end{aligned}\quad (4)$$

где N — общее количество фокусов, два из которых «неподвижные»;

$(N - 2)$ — количество «подвижных» фокусов.

Для любой точки N -фокусного эллипса должно соблюдаться следующее условие:

$$\sum_{i=1}^N D_i = a_N = \text{const}, \quad (5)$$

где D_i — расстояние от точки N -фокусного эллипса до i -го фокуса.

Таким образом, в общем виде N -фокусный эллипс, аппроксимирующий ЗНБ, может быть представлен в форме кортежа:

$$SD = \left\{ SD_i \mid_{i=1}^N, SD_i = \left[(x_{F_i}, y_{F_i}), V, m_v, \Delta t, \text{ПУ}, m_{\text{ПУ}} \right] \right\}. \quad (6)$$

N -фокусный эллипс, в частности трехфокусный, можно также рассматривать как семейство точек пересечения множества софокусных двухфокусных эллипсов (построенных относительно «неподвижных» фокусов (F_1, F_2) — рис. 2) при переменном значении главных полуосей (a, b), но неизменном фокусном расстоянии c с окружностями переменного радиуса с центром F_3 (см. рис. 3) в «подвижном» фокусе при выполнении условия (5). В общем случае получается

по две точки пересечения софокусных эллипсов с окружностями и два частных варианта, каждый из которых дает по одной точке пересечения.

В исследовании [1] получены выражения для направления и модуля полного (суммарного) градиента изолинии ограждающего НО N -фокусного эллипса, предлагаемые использовать в рамках настоящего исследования для решения задач обеспечения требуемых условий безопасности плавания судна (см. рис. 2):

$$\tau_{\Sigma D} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \sin \tau_i}{\sum_{i=1}^k \cos \tau_i} \right);$$

$$g_{\Sigma D} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^k \sin \tau_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^k \cos \tau_i \right)^2},$$
(7)

где $\tau_{\Sigma D}$, $g_{\Sigma D}$ — соответственно направление и модуль полного (суммарного) градиента в некоторой точке N -фокусного эллипса.

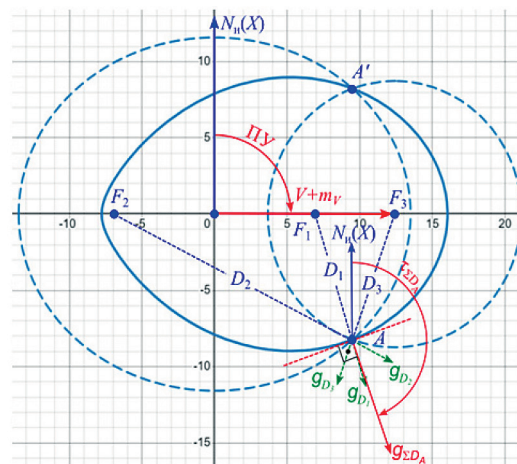


Рис. 2. Трехфокусный эллипс ЗНБ судна, градиенты, условия построения:

A, A' — точки на 3х-фокусном эллипсе ЗНБ, полученные от пересечения i -го софокусного (F_1, F_2) двухфокусного эллипса с окружностью из (F_3) радиуса D_3 ; D_1, D_2, D_3 — дистанции от соответствующих фокусов до точки трехфокусного эллипса ЗНБ; g_{D1}, g_{D2}, g_{D3} — градиенты для соответствующих дистанций в точке A ; $\tau_{\Sigma DA}, g_{\Sigma DA}$ — соответственно направление и модуль полного (суммарного) градиента в точке A

Для решения различных задач обеспечения безопасности судовождения необходимо разработать принципы управления N -фокусным эллипсом ЗНБ первоначально на кинематическом уровне. В этой связи базовой (исходной) задачей является определение позиций особых «характерных» точек на границе ЗНБ в геометрической взаимосвязи положения на плоскости судна, НО (рис. 3 точка C) и их текущих / мгновенных параметров движения. Предлагается рассмотреть обобщенный метод решения поставленной задачи на примере трехфокусного эллипса ЗНБ для следующих точек (см. рис. 3): ближайшая — K , пересечение с ЛОД — L), «крайние» (граничные): E_1, E_2 , через которые проходят касательные к контуру ЗНБ из НО, рассматриваемой в виде точки C .

Данная задача не является тривиальной ввиду нелинейности уравнения N -фокусного эллипса ЗНБ (4) и вариации его размеров и формы, что вызвано изменением координат «подвижных» фокусов в процессе движения собственного судна. Предлагается решение, основанное на принципах разработанного В. В. Каврайским¹ обобщенного метода линий положения (ЛП), представленное в общем виде в векторно-матричной форме:

¹ Каврайский В. В. Избранные труды. Т. 1: Астрономия и геодезия / В. В. Каврайский. М.: Изд. УНГС ВМФ, 1956. 358 с.

324

– по текущим параметрам безопасности ЗНБ (выражения (4), (5)) оценивается отличие суммы дистанций $\sum_{i=1}^N D_c$ от a_N , имеющее смысл разницы навигационных параметров в теории ОМС:

$$\sum_{i=1}^N D_c - a_N; \quad (9)$$

– принимается следующее допущение: направления и модули градиентов в точках K и C (см. рис. 3 и 4), через которые проходят разные софокусные N -фокусные эллипсы, один из которых аппроксимирует ЗНБ и проходит через точку K , другой — через точку C , практически совпадают:

$$\begin{aligned} \tau_1 = \tau_{\Sigma D_c}; \quad \tau_2 = \tau_1 + 90^\circ = \tau_{\Sigma D_c} + 90^\circ (0^\circ \leq \tau_2 \leq 360^\circ); \\ l_1 = 0; \quad l_2 = \frac{\sum_{i=1}^N D_c - a_N}{g_{\Sigma D_c}}. \end{aligned} \quad (10)$$

В этом случае матрицы коэффициентов системы уравнений (8) и свободных членов, ввиду ортогональности направления градиента в любой точке N -фокусного эллипса и касательной в этой же точке, примут вид (см. рис. 3 и 4):

$$A = \begin{bmatrix} \cos \tau_{\Sigma D_c} & \sin \tau_{\Sigma D_c} \\ -\sin \tau_{\Sigma D_c} & \cos \tau_{\Sigma D_c} \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N D_c - a_N}{g_{\Sigma D_c}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Далее решается система уравнений вида (8) с учетом (11), т. е. находится точка пересечения двух ортогональных линий (направления градиента $g_{\Sigma D_c}$ и касательной к N -фокусному эллипсу (ЗНБ)) — см. рис. 4, точка K' .

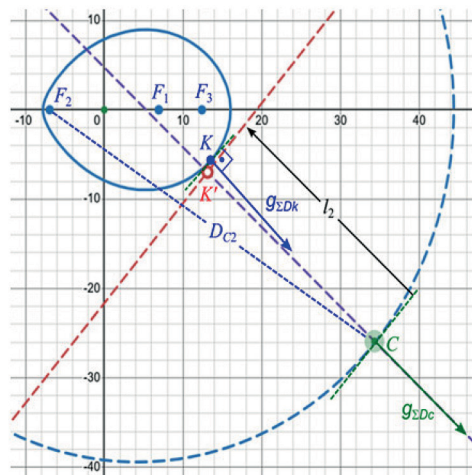


Рис. 4. Результаты моделирования поиска ближайшей точки на ЗНБ:

K — ближайшая к НО точка на ЗНБ; K' — точка, полученная после первой итерации (приближения);

$g_{\Sigma D_c}, g_{\Sigma DK}$ — градиенты софокусных N -фокусных эллипсов в точке C и K соответственно

Полученные координаты точки K' , учитывая методические погрешности, вызванные линеаризацией и отличием в общем случае как направления, так и модуля градиента в точках C и искомой K для софокусных N -фокусных эллипсов, принимаются за исходные и последовательность повторяется до тех пор, пока, например, не будут одновременно выполнены следующие условия:

$$\sum_{i=1}^N D_c - a_N \leq \min; \quad \wedge \quad \tau_{\Sigma DK} - \tau_{\Sigma DK'} \leq \min. \quad (12)$$

Поиск крайних точек (E_1, E_2 (см. рис. 3)) на границе ЗНБ предлагается начинать согласно процедуре, аналогичной поиску ближайшей точки, рассмотренной ранее, но для первоначального расчета координат точки, находящейся внутри N -фокусной ЗНБ, близкой к ее геометрическому центру (точка O' рис. 5) и расположенной на направлении градиента $\tau_{\Sigma DC}$ в точке C (см. формулу (10)). Следовательно, для получения координат точки O' при решении системы уравнений (8) необходима корректировка матрицы свободных членов:

$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N D_c}{g_{\Sigma D_c}} \end{bmatrix}.$$

После решения системы уравнений вида (8) от полученной точки (точка O' рис. 5) на направлениях, близких к направлениям градиентов в крайних точках (E_1, E_2 , см. рис. 3 и 5) N -фокусного ЗНБ, находятся промежуточные точки (см. рис. 5 точки E'_1, E'_2), а именно:

– определяются по известным выражениям направления и дистанции от всех N фокусов ЗНБ до точки O' (см. рис. 5);

– рассчитывается сумма дистанций $\sum_{i=1}^N D_{O'}$ от точки O' до N фокусов ЗНБ и ее отличие от принятых параметров безопасности N -фокусного эллипса ЗНБ (выражения (4), (5)) — приближенные направления градиентов:

$$\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N; \quad (13)$$

$$\tau_1 = \tau_{\Sigma D_c} \pm \beta; \quad \tau_2 = \tau_{\Sigma D_c};$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N \right) g_{\Sigma D_c}}{g_{\Sigma 3 D_{O'}} \sum_{i=1}^N D_c} \right); \quad (14)$$

$$l_1 = 0; \quad l_2 = \frac{\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N}{g_{\Sigma D_{O'}}}.$$

Тогда матрицы коэффициентов системы уравнений (8) и свободных членов примут вид:

$$A = \begin{bmatrix} \cos(\tau_{\Sigma D_c} \pm \beta) & \sin(\tau_{\Sigma D_c} \pm \beta) \\ \cos(\tau_{\Sigma D_c}) & \sin(\tau_{\Sigma D_c}) \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^N D_{O'} - a_N}{g_{\Sigma D_{O'}}} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

после чего решается система уравнений вида (8) с учетом (15), т. е. находятся точки пересечения линий под углом β (см. рис. 5, точки E'_1, E'_2).

Полученные координаты точек E'_1, E'_2 , учитывая методические погрешности из-за линеаризации уравнений и отличия в общем случае как направлений, так и модулей градиентов, согласно выражению (13), от искомым в точках E_1, E_2 для софокусных N -фокусных эллипсов, целесообразно принять за исходные и последовательно повторить до тех пор, пока, например, одновременно не будут соблюдены условия:

$$\sum_{i=1}^k D_E - a_N \leq \min; \quad \wedge \quad \tau_{\Sigma DE} - \text{ИП}_{CE} \pm 90^\circ \leq \min. \quad (16)$$

Таким образом, для «крайних» точек E_1, E_2 контура N -фокусной ЗНБ должны соблюдаться следующие условия: сумма дистанций до всех N фокусов стремится к a_N и направление касательной из точки C к контуру N -фокусной ЗНБ (ИП из точки C на любую «крайнюю» точку E) ортогонально направлению градиента в соответствующих крайних точках E_1, E_2 (рис. 5).

Поиск точки пересечения N -фокусной ЗНБ с ЛОД (точка, в которой произойдет нарушение предустановленных условий безопасности a_N по формуле (4), т. е. условие контакта точки C (НО) с ЗНБ при неизменных параметрах движения собственного судна и цели предлагается выполнять

аналогично алгоритму поиска ближайшей к НО (точка C) точки на N -фокусной ЗНБ при соответствующей корректировке матрицы коэффициентов системы уравнений вида (8) путем замены направлений градиентов на направление ЛОД, которое можно получить, например, с помощью известного решения векторного скоростного треугольника [17]–[22], а именно:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \tau_{\text{ЛОД}} & \sin \tau_{\text{ЛОД}} \\ -\sin \tau_{\text{ЛОД}} & \cos \tau_{\text{ЛОД}} \end{bmatrix}.$$

Решение (пересечение ЛОД с границей ЗНБ) существует при следующем условии: направление ЛОД лежит в пределах направлений (сектора), см. рис. 3, образованного касательными, проведенными из точки C к контуру N -фокусной ЗНБ.

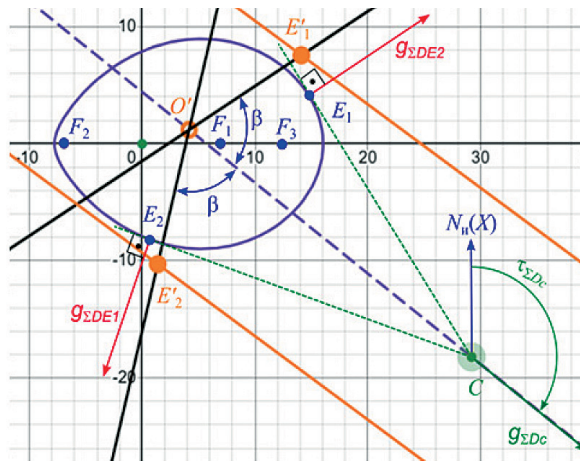


Рис. 5. Результаты моделирования поиска «крайних» точек на ЗНБ:

E_1, E_2 — крайние точки контура ЗНБ, E'_1, E'_2 — крайние точки, полученные после первой итерации;
 $g_{\Sigma DE_1}, g_{\Sigma DE_2}, g_{\Sigma Dc}$ — градиенты софокусных N -фокусных эллипсов в точках E_1, E_2, C соответственно

В случаях, когда ЛОД не находится в границах сектора, образованных этими касательными, предустановленные условия безопасности не будут нарушены при неизменности кинематических параметров движения как собственного судна, так и объекта (цели), т. е. расхождение произойдет на безопасном расстоянии.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение N -фокусного эллипса ЗНБ позволит решать всевозможные задачи оптимизации процесса управления судном, в которых, как правило, необходимы операции дифференцирования, что возможно, если уравнения модели ЗНБ непрерывны.

2. Для принятия решения по управлению конфигурацией N -фокусного эллипса ЗНБ необходимо оценить положения особых «характерных» точек на ЗНБ: ближайшей и крайних, расположенных на пересечении границы ЗНБ с ЛОД. Расчет координат прямых, обратных направлений и дистанций от этих точек до НО, не является тривиальной задачей в силу нелинейности уравнения N -фокусного эллипса, аппроксимирующего ЗНБ, вариативности формы и размеров в зависимости от текущих условий плавания (например, при изменении кинематических параметров движения судна от воздействий гидрометеорологического характера). Предлагается обобщенный метод решения, не зависящий от количества фокусов эллипса, аппроксимирующего ЗНБ, аналогичный традиционно используемому в судовождении и основанному на линейаризации изолиний навигационных параметров, поэтому его реализация в современных навигационных комплексах не вызовет особых сложностей. Результаты компьютерного моделирования, представленные в форме рисунков, подтверждают правомерность выводов и алгоритмов.

3. Более глубоким исследованиям подлежит проблема выбора количества и наилучшего сочетания расположения подвижных фокусов N -фокусного эллипса ЗНБ от условий плавания, оптимального управления перемещением точек контакта ЗНБ с НО (например, точки L , см. рис. 3) в виде выработки на первом этапе рекомендованного вектора движения, а в дальнейшем — силовых воздействий на органы управления судном с учетом различного рода ограничений.

4. Особая перспективность единообразных технологий аппроксимации границ НО, формализации ЗНБ N -фокусными кривыми, в частности эллипсами, и разработка принципов управления прогнозируется для автономного судовождения в прибрежных, портовых условиях плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васьков А. С. Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2023. — № 3–1(61). — С. 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036. — EDN OOIQL.

2. Васьков А. С. Методологические основы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности: спец. 05.22.16: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук / А. С. Васьков. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 1998. — EDN ZJKICF.

3. Васьков А. С. Модель многофокусного эллипса зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Морские интеллектуальные технологии. — 2024. — № 4–1(66). — С. 259–266. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.031. — EDN RNFIUG.

4. Егоров И. Б. Концепция зон навигационной безопасности и её применение в судовождении / И. Б. Егоров, В. А. Логиновский // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3(69). — С. 13–17. — EDN PASLDR.

5. Пашенцев С. В. Построение зоны навигационной безопасности объекта и его кинематических характеристик на основе обсервации двух разнесенных точек объекта / С. В. Пашенцев // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2000. — Т. 3. — № 1. — С. 13–16. — EDN PIYANV.

6. Смоленцев С. В. Адаптивный динамический домен безопасности для различных условий плавания / С. В. Смоленцев, А. Е. Филяков, Д. В. Исаков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940. — EDN NYGUQS.

7. Швецова А. Ф. Концепция зоны навигационной безопасности: формирование и этапы развития / А. Ф. Швецова, А. А. Лентарев // Проблемы транспорта Дальнего Востока: доклады науч.-практ. конф. — 2017. — Т. 1. — С. 123–132. — EDN YXOSXT.

8. Dinh G. H. The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area / G. H. Dinh, N.-K. Im // International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 97–108. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.009.

9. Lee H.-J. Seafarers' awareness-based domain modelling in restricted areas / H.-J. Lee, Y. Furukawa, D.-J. Park // Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 5. — Pp. 1172–1188. DOI: 10.1017/S0373463321000394.

10. Liu D. Research on Dynamic Quaternion Ship Domain Model in Open Water Based on AIS Data and Navigator State / D. Liu, Z. Zheng, Z. Liu // Journal of Marine Science and Engineering. — 2024. — Vol. 12. — Is. 3. DOI: 10.3390/jmse12030516.

11. Pietrzykowski Z. Effective ship domain — Impact of ship size and speed / Z. Pietrzykowski, M. Wielgosz // Ocean Engineering. — 2021. — Vol. 219. — Pp. 108423. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108423.

12. Rawson A. Developing contextually aware ship domains using machine learning / A. Rawson, M. Brito // Journal of Navigation. — 2021. — Vol. 74. — Is. 3. — Pp. 515–532. DOI: 10.1017/S0373463321000047.

13. Szlapczynski R. Review of ship safety domains: Models and applications / R. Szlapczynski, J. Szlapczynska // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 145. — Pp. 277–289. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.020.

14. Zhang F. A Spatiotemporal Statistical Method of Ship Domain in the Inland Waters Driven by Trajectory Data / F. Zhang, X. Peng, L. Huang, M. Zhu, Y. Wen, H. Zheng // Journal of Marine Science and Engineering. — 2021. — Vol. 9. — Is. 4. DOI: 10.3390/jmse9040410.

15. Wielgosz M. The ship domain in navigational safety assessment / M. Wielgosz, Z. Pietrzykowski // PLOS ONE. — 2022. — Vol. 17. — Is. 4. — Pp. 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0265681.

16. Wang Z. Risk Identification Method for Ship Navigation in the Complex Waterways via Consideration of Ship Domain / Z. Wang, Y. Wu, X. Chu, C. Liu, M. Zheng // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11. — Is. 12. DOI: 10.3390/jmse11122265.
17. Гриняк В. М. Нечеткая система предупреждения об опасном сближении морских судов / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. — 2016. — № 2. — С. 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078. — EDN VPTMJN.
18. Дмитриев С. П. Синтез безопасных траекторий расхождения судов с использованием методов искусственного интеллекта / С. П. Дмитриев, Н. В. Колосов, А. В. Осипов // *Судостроение*. — 2000. — № 3(730). — С. 39–42. — EDN HYSLXB.
19. Корнев А. С. Использование решения задачи “машины Дубинса” для исключения ситуации опасного сближения двух судов / А. С. Корнев, С. П. Хабаров, А. Г. Шпекторов // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2022. — № 2–1(56). — С. 127–135. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.017. — EDN RUZNZC.
20. Кургузов С. С. Определение реальной дистанции расхождения судов по информации АИС / С. С. Кургузов, М. П. Хаджинов // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2009. — № 2(56). — С. 31–33. — EDN KVEWRF.
21. Некрасов С. Н. Вычисление гарантированного курса расхождения при опасности сближения вплотную / С. Н. Некрасов, Д. В. Трененков, К. И. Ефимов // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 1(29). — С. 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15. — EDN TKJMTZ.
22. Пелевин А. Е. Гарантированная оценка зоны допустимого сближения судов в море / А. Е. Пелевин // *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова*. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 823–830. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830. — EDN SOEIYS.

REFERENCES

1. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. “The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems.” *Morskie intelektual'nye tekhnologii* 3–1(61) (2023): 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.
2. Vas'kov, A. S. Metodologicheskie osnovy upravleniya dvizheniem sudna i konfiguratsiey zony navigatsionnoy bezopasnosti: spetsial'nost' 05.22.16. Grand PhD diss. Sankt-Peterburg, 1998.
3. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. “The multifocal ellipse ship's domain model.” *Morskie intelektual'nye tekhnologii* 4–1(66) (2024): 259–266. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.031.
4. Egorov, I. B. and V. A. Loginovskiy. “Review of ship domain concept and it's application in navigation.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(69) (2012): 13–17.
5. Pashentsev, S. V. «Postroenie zony navigatsionnoy bezopasnosti ob'ekta i ego kinematicheskikh kharakteristik na osnove observatsii dvukh raznesennykh tochek ob'ekta.» *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 3.1 (2000): 13–16.
6. Smolentsev, S. V., A. E. Filyakov and D. V. Isakov. “Adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions adaptive dynamic safety domain for different sailing conditions.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 15.6 (2023): 932–940. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-932-940.
7. SHvetsova, A. F. and A. A. Lentarev. “Kontseptsiya zony navigatsionnoy bezopasnosti: formirovanie i etapy razvitiya.” *Transport Problems of The Far East. Proceedings of The Scientific and Practical Conference* 1 (2017): 123–132.
8. Dinh, G. H. and N.-K. Im. “The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 4 (2016): 97–108. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.009.
9. Lee, H.-J., Y. Furukawa and D.-J. Park. “Seafarers' awareness-based domain modelling in restricted areas.” *Journal of Navigation* 74.5 (2021): 1172–1188. DOI: 10.1017/S0373463321000394.
10. Liu, D., Z. Zheng and Z. Liu. “Research on Dynamic Quaternion Ship Domain Model in Open Water Based on AIS Data and Navigator State.” *Journal of Marine Science and Engineering* 12.3 (2024). DOI: 10.3390/jmse12030516.
11. Pietrzykowski, Z. and M. Wielgosz. “Effective ship domain — Impact of ship size and speed.” *Ocean Engineering* 219 (2021): 108423. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108423.
12. Rawson, A. and M. Brito. “Developing contextually aware ship domains using machine learning.” *Journal of Navigation* 74.3 (2021): 515–532. DOI: 10.1017/S0373463321000047.

13. Szlapczynski, R. and J. Szlapczynska. "Review of ship safety domains: Models and applications." *Ocean Engineering* 145 (2017): 277–289. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.09.020.
14. Zhang, F., H. Zheng, et al. "A Spatiotemporal Statistical Method of Ship Domain in the Inland Waters Driven by Trajectory Data." *Journal of Marine Science and Engineering* 9.4 (2021). DOI: 10.3390/jmse9040410.
15. Wielgosz, M. and Z. Pietrzykowski. "The ship domain in navigational safety assessment." *PLOS ONE* 17.4 (2022): 1–21. DOI: 10.1371/journal.pone.0265681.
16. Wang, Z., M. Zheng, et al. "Risk Identification Method for Ship Navigation in the Complex Waterways via Consideration of Ship Domain." *Journal of Marine Science and Engineering* 11.12 (2023). DOI: 10.3390/jmse11122265.
17. Grinyak, V. M. and A. S. Devyatisil'nyi. "Fuzzy collision avoidance system for ships." *Journal Of Computer And Systems Sciences International* 2 (2016): 93. DOI: 10.7868/S0002338816010078.
18. Dmitriev, S. P., N. V. Kolosov and A. V. Osipov. "Synthesis of safe passing trajectories, using artificial intelligence methods." *Shipbuilding* 3(730) (2000): 39–42.
19. Korenev, A. S., S. P. Khabarov and A. G. Shpektorov. "Application of the dubins path problem to avoid the dangerously close approach of two vessels." *Morskie intelektual'nye tekhnologii* 2–1(56) (2022): 127–135. DOI: 10.37220/MIT.2022.56.2.017.
20. Kurguzov, S. S. and M. P. Khadzhinov. "Defining the real distance for prevention of ships collisions under the ais information." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(56) (2009): 31–33.
21. Nekrasov, S. N., D. V. Trenenkov and K. I. Efimov. «Vychislenie garantirovannogo kursa raskhozhdeniya pri opasnosti sblizheniya vplotnuyu.» *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 1(29) (2015): 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15.
22. Pelevin, A. E. "Guaranteed estimation of ships' domains." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admiral S. O. Makarova* 11.5 (2019): 823–830. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-823-830.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мироненко Александр Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: alex_mironenko@mail.ru,
mironenkoaa@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mironenko, Aleksandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: alex_mironenko@mail.ru,
mironenkoaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 марта 2025 г.
Received: Mar. 24, 2025.