

УДК: 656.61.052.4

# АВТОНОМНОЕ СУДОВОЖДЕНИЕ ПО ИЗОЛИНИЯМ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

**А.С. Васьков**

*Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф.Ушакова*  
Россия, 353922, Новороссийск, просп. Ленина, 93  
e-mail: as.vaskov@mail.ru

**А.А. Мироненко**

*Государственный университет морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова*  
Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7  
e-mail: alex\_mironenko@mail.ru

**Ключевые слова:** навигационный параметр, пеленг, дистанция, изолиния, гипербола, эллипс, программная траектория, ограждение опасностей, контроль движения.

**Аннотация.** Рассматриваются перспективы применения изолиний основных навигационных параметров (пеленгов и дистанций), их комбинаций (разностей и сумм пеленгов, дистанций) при использовании пар ориентиров для планирования и контроля движения судна в условиях прибрежного плавания. Дано обоснование применения изолиний (гипербол, эллипсов, многополюсных эллипсов) для ограждения навигационных опасностей, задания и контроля движения судна по программной траектории с учетом конфигурации водного пути. Формализация предлагаемых методов в современных навигационных комплексах автономного судовождения позволит решать задачи обработки навигационной информации в стесненных условиях плавания на качественно новом уровне и в неразрывной связи с традиционными подходами.

## 1. Введение

Формализация навигационной обстановки, планирование программной траектории (ПТ) и контроль движения судна – предмет множества исследований, остается актуальной проблемой, составляет основу перспективного автономного судовождения. Анализ многочисленных источников [1-8] выявил некоторые недостатки подходов:

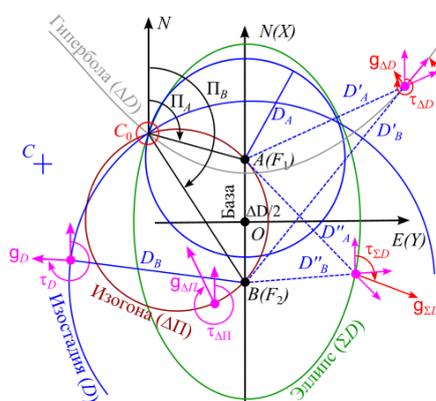
- «а-физичность» задания криволинейных участков ПТ и как следствие – опасность и невозможность обеспечения точной проводки судна по ним;
- слабая взаимосвязь традиционных способов планирования и контроля движения судна на ПТ навигационными параметрами (НП) с методами, реализованными в современных навигационных комплексах, системах автоматического управления.

Планирование ПТ должно включать как математическое описание, так и «привязку» ее элементов к конфигурации района плавания, ориентирам и маневренным качествам судна. Современные судовые системы ECDIS, САРП и т.п. позволяют решить задачи обработки навигационной информации, сопровождения множества объектов (ориентиров), построения на электронной карте любых аналитических кривых, ограждения навигационных опасностей (НО) и районов, оперативного контроля движения судна, в частности, угловой скорости поворота во взаимосвязи с линейной скоростью движения относительно грунта по ПТ запланированной кривизны в соответствии с районом плавания. Это существенно расширит спектр автономного и дистанционного управления судном и обеспечит безопасность мореплавания [2, 3].

## 2. Планирование ПТ изолиниями НП

При плавании в стесненных водах традиционно применяется технология контроля движения судна ведущими, ограждающими, контрольными изолиниями или линиям положения (ЛП) измеряемых НП, как правило, пеленгов и дистанций до ориентиров. Ведущими подбирают изолинии НП, совпадающие с направлением ПТ, ограждающими – изолинии НП в зависимости от расположения НО, контрольными – изолинии НП, перпендикулярные ПТ или совпадающие с направлением следующего отрезка ПТ.

По исследованиям [2, 3] предлагается использовать пары ориентиров таким образом, чтобы, в дополнении, обеспечить их надежную идентификацию по однозначному взаимному расположению. Измеренные НП – пеленги и дистанции до ориентиров и их комбинации дают семь избыточных изолиний: окружности (по дистанциям (изостадии) и по горизонтальному углу – разности двух пеленгов (изогоны); изопеленги (по пеленгам); софокусные гиперболы (по разностям дистанций) и эллипсы (по сумме дистанций) рис. 1.



**Рис. 1.** Изолинии пары ориентиров:  $XOY$  – прямоугольные координаты, связанные с базой ориентиров;  $N, E$  – направления на север и восток;  $C, C_o$  – счислимое место судна (СМС) и ОМС;  $A(F_1), B(F_2)$  – ориентиры (софокусы гиперболы и эллипса);  $\Pi_A, \Pi_B, D_A, D_B$  – пеленги и дистанции до ориентиров;  $\Delta D, \Sigma D$  – разность и сумма дистанций до ориентиров;  $\tau_D, g_D, \tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}, \tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$  – направления и модули градиентов дистанции, разности и суммы дистанций.

Комбинация пеленгов и дистанций дает параллельный индекс (ПИ), технология которых реализована в ECDIS, САПП. На основе теории определения координат обсервованного места судна (ОМС), уравнения и свойства изолиний в системе прямоугольных координат, связанных с центром пары (базы) ориентиров или смещенным центром, можно представить в виде [2,3]:

1. Изолинии окружностей для НП дистанций  $R = (D_A, D_B) = const$  и горизонтального угла  $\gamma = |\Pi_A - \Pi_B| = const$ :

$$(1) \quad (x_i - x_{\Pi})^2 + (y_i - y_{\Pi})^2 = R^2;$$

$$(2) \quad \tau_D = \Pi_{A,B} \pm 180^\circ; \quad g_D = 1;$$

$$(3) \quad R = \frac{d}{2 \sin \gamma}; \quad g_\gamma = 57,3 \frac{d}{D_{ADB}}; \quad \tau_\gamma = \Pi_A + \operatorname{arcctg} \frac{D_A \sin \gamma}{D_B - D_A \cos \gamma},$$

где  $x_i, y_i, x_{\Pi}, y_{\Pi}, R$  – прямоугольные координаты ориентиров, смещения центра и радиус окружности – изолинии, мили;  $d$  – базовое расстояние, мили;  $\Pi_{i(A,B)}, \gamma$  – пеленги на ориентиры и горизонтальный угол между ними,  $^\circ$ ;  $\tau_\gamma, g_\gamma$  – направление и модуль градиента горизонтального угла.

2. Изолинии – изопеленги для НП – прямого пеленга  $\Pi_i = (\Pi_A, \Pi_B) = const$ :

$$(4) \quad \Pi_i = \arctg \frac{y_i - y_c}{x_i - x_c}; \quad g_{\Pi(A,B)} = \frac{57,7^\circ}{D_{A,B}}, [\text{°/мили}]; \quad \tau_{\Pi(A,B)} = \Pi_i - 90^\circ,$$

где  $\tau_{\Pi(A,B)}$ ,  $g_{\Pi(A,B)}$  – направления и модули градиентов пеленгов, °, °/мили;  $x_c$ ,  $y_c$  – прямоугольные координаты СМС, мили.

3. Изолинии – гиперболы для НП – разности дистанций:

$$(5) \quad \frac{(x-x_{\Pi})^2}{a^2} - \frac{(y-y_{\Pi})^2}{b^2} = 1; \quad a = \frac{D_A - D_B}{2} = \text{const}; \quad b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2};$$

$$(6) \quad \tau_{\Delta D} = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 90^\circ; \quad g_{\Delta D} = \left| 2 \sin \frac{w}{2} \right|; \quad w = \Pi_A - \Pi_B,$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $e$  – соответственно большая, малая полуоси и эксцентриситет гиперболы;  $w$  – базовый угол между ориентирами, °.

4. Изолинии – эллипса для НП – суммы дистанций:

$$(7) \quad \frac{(x-x_{\Pi})^2}{a^2} + \frac{(y-y_{\Pi})^2}{b^2} = 1; \quad a = \frac{D_A + D_B}{2} = \text{const}; \quad b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}};$$

$$(8) \quad \tau_{\Sigma D} = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 180^\circ; \quad g_{\Sigma D} = \left| 2 \cos \frac{w}{2} \right|.$$

Контроль движения судна по наблюдениям пар ориентиров сводится к решению системы семи уравнений изолиний (1) – (8) методами редуцированных ЛП и наименьших квадратов для компенсации случайных и систематических погрешностей в векторно-матричной форме, которые обеспечивают уменьшение погрешности на два-три порядка по сравнению с любой парой из семи изолиний [2,3]

$$(9) \quad \Delta X = (A^T P A)^{-1} A^T P^{-1} L; \quad x_o = x_c + \Delta x; \quad y_o = y_c + \Delta y;$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \left( \cos \tau_1 - \frac{\sum_1^7 \cos \tau_i}{7} \right) & \left( \sin \tau_1 - \frac{\sum_1^7 \sin \tau_i}{7} \right) \\ \left( \cos \tau_2 - \frac{\sum_1^7 \cos \tau_i}{7} \right) & \left( \sin \tau_2 - \frac{\sum_1^7 \sin \tau_i}{7} \right) \\ \dots & \dots \\ \left( \cos \tau_7 - \frac{\sum_1^7 \cos \tau_i}{7} \right) & \left( \sin \tau_7 - \frac{\sum_1^7 \sin \tau_i}{7} \right) \end{bmatrix}; \quad L = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_1}{g_1} - \frac{\sum_1^7 \Delta_i / g_i}{7} \\ \frac{\Delta_2}{g_2} - \frac{\sum_1^7 \Delta_i / g_i}{7} \\ \dots \\ \frac{\Delta_7}{g_7} - \frac{\sum_1^7 \Delta_i / g_i}{7} \end{bmatrix};$$

$$P = \begin{bmatrix} g_1^2 / m_1^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2^2 / m_2^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_7^2 / m_7^2 \end{bmatrix}$$

где  $\Delta X$  – матрица-столбец искомых поправок к СМС ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) для получения ОМС ( $x_o$ ,  $y_o$ );  $A$ ,  $A^T$  – прямая и транспонированная матрицы редуцированных коэффициентов ЛП;  $P$ ,  $P^{-1}$  – прямая и обратная матрицы весов ЛП;  $L$  – матрица-столбец переносов ЛП;  $\Delta_i$ ,  $\tau_i$ ,  $m_i$  – разности измеренных и счислимых значений НП, направления градиентов ЛП, средние квадратические погрешности (СКП) НП.

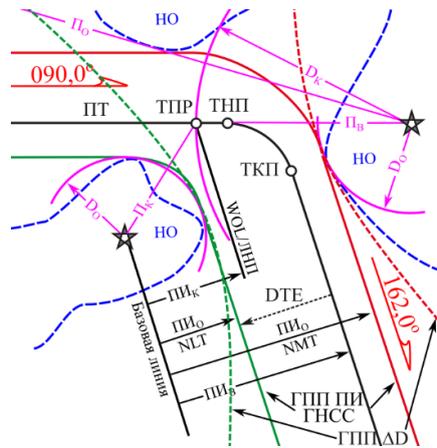
Оперативный контроль движения судна, в том числе с участием в системе управления судоводителя удобно и целесообразно осуществлять непосредственно по НП, определяющим изолинии: ведущие по ПТ, контрольные (точки перекадки руля (ТПР), начала поворота (ТНП), конца поворота (ТКП)), ограждающие НО, ПИ и границы гарантированной полосы проводки (ГПП) судна, нанесенные на карту ECDIS рис. 2.

Для прямолинейных отрезков ПТ наиболее универсальным являются применение ведущих, ограждающих и контрольных в виде ПИ.

На криволинейных участках ПТ судовождение является наиболее ответственным. Планирование на них ПТ предлагается осуществлять кривыми переменной кривизны, например, гиперболой или эллипсом (5)–(8), которые подбираются для района плавания и под маневренные качества судна, а координаты точек их дуг строятся по выражениям

$$(10) \quad x = \frac{(D_A + a)}{e} = \frac{\Delta D (2D_A + \Delta D)}{2d}; \quad y = \sqrt{\frac{4b^2 (D_A + a)^2}{d^2} - b^2};$$

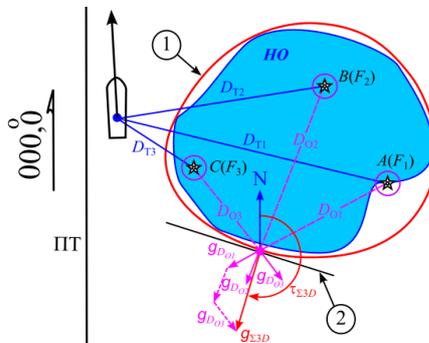
$$(11) \quad x = \frac{D_A - a}{e} = \frac{D_A^2 - D_B^2}{2d}; \quad y = \sqrt{D_B^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 - d^2}{2d}\right)^2} = \sqrt{D_A^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 + d^2}{2d}\right)^2}$$



**Рис.2.** Инфографика визуальных, радиолокационных и ECDIS методов контроля движения судна по ПТ: Пв, По, Пк, ПИв, ПИо, ПИк – ведущие, ограждающие, контрольные пеленги и параллельные индексы; Dо, Dк – дистанции ограждающая и контрольная; NLT – not less than (не менее); NMT – not more than (не более).

Эти кривые являются одновременно ведущими и ограждающими изолиниями контроля движения судна по разности или сумме дистанцией до ориентиров – фокусов. Ограждающие гиперболы и эллипса не перекрывают доступное пространство для безопасного маневрирования судна в отличие от пеленгов и дистанций [3], рис 2.

Безопасность судовождения в сложных конфигурациях НО предлагается контролировать приближением суммы дистанций (D<sub>i</sub>) до точек НО *i*-го ориентира – фокусами замкнутой кривой многофокусного (*k*) эллипса [3, 9], что по своей формулировке не отличается от классической аппроксимации  $\sum_{i=1}^k D_i = const$  рис. 3.



**Рис. 3.** Ограждение НО многофокусным эллипсом: 1 – изолиния суммы дистанций (дуга *k*-эллипса); 2 – касательная к изолинии суммы дистанций; A(F<sub>1</sub>), B(F<sub>2</sub>), C(F<sub>3</sub>) – ориентиры-фокусы 3-х фокусного эллипса НО; D<sub>T1</sub>, D<sub>T2</sub>, D<sub>T3</sub>, D<sub>O1</sub>, D<sub>O2</sub>, D<sub>O3</sub>, – дистанции до ориентиров от текущей позиции судна и ограждающие НО; τ<sub>i</sub>, g<sub>i</sub>, τ<sub>Σ3D</sub>, g<sub>Σ3D</sub> – направления и модули градиентов дистанций и многофокусного эллипса.

Из свойств эллипсов (8) выводится направление и модуль градиента изолинии многофокусного эллипса:

$$(12) \quad \tau_{\Sigma 3D} = \text{artan} \left( \frac{\sum_{i=1}^k \sin \tau_i}{\sum_{i=1}^k \cos \tau_i} \right); \quad g_{\Sigma 3D} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^k \sin \tau_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^k \cos \tau_i\right)^2}.$$

Инфографика на ECDIS 3-го фокусного эллипса можно рассматривать как семейство точек пересечения 2-х фокусного эллипса с дугой окружности из третьего фокуса:

$$(13) \quad D_1 + D_2 \pm \lambda g_{\Sigma 2D} = const; \quad D_3 \mp \lambda g_{\Sigma 2D} = const; \quad D_1 + D_2 + D_3 = const,$$

где  $\lambda$  – минимальное Евклидово расстояние между соседними точками на дуге 3-х фокусного эллипса,  $g_{\Sigma 2D}$  – градиент суммы двух дистанций по (2).

После преобразований из выражений (7), (8), (13) получается принцип и выражения построения точек  $k$ -фокусного огибающего эллипса:

$$(14) \quad x = \frac{D_1^2 - D_3^2}{2(d_1 - d_2)}; \quad y = \sqrt{D_2^2 - \left(x + \frac{d_2}{2}\right)^2}.$$

Тогда, допустимое смещение судна ( $DTE$ ) с ПТ контролируется системой управления сравнением сумм текущих и огибающих дистанций или по типу переносов ЛП:

$$DTE = \frac{(D_A + D_B + D_C) - (D_A + D_B + D_C)_0}{g_{\Sigma 2D}}.$$

Для произвольной конфигурации навигационной обстановки ведущие, контрольные и огибающие изолинии подстраиваются посредством поворота и переноса системы координат, связанной с ориентирами:

$$(15) \quad x = x' \cos \beta - y' \sin \beta - \Delta x'; \quad y = x' \sin \beta + y' \cos \beta + \Delta y'$$

где  $\beta$  – угол поворота системы координат, связанной с ориентирами;  $\Delta x'$ ,  $\Delta y'$  – относительные переносы координат между системами  $XOY$  и  $X'O'Y'$ .

### 3. Заключение

Кривые второго порядка во взаимосвязи с конфигурацией района, ориентиров, маневренными качествами, силовыми воздействиями позволят расширить спектр методов планирования физически реализуемых ПТ и контроля движения судна по НП в целях повышения безопасности традиционного и автономного судовождения.

Выбор наилучшего взаимного расположения навигационных ориентиров для аппроксимируемого участка ПТ по точности проводки и простоте контроля движения судна измеряемыми НП (пеленг и дистанция) подлежит дополнительному изучению.

### Список литературы

1. Азаров М.М., Ляпин В.И., Кудинов О.Б. Методы и алгоритмы автоматического управления движением судов по линии заданного радиуса поворота // Системы управления и обработки информации. 2016. № 4 (35). С. 28-47.
2. Васьков А.С., Мироненко А.А. Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О.Макарова. 2022. Т. 14, № 6. С. 826-836.
3. Васьков А.С., Мироненко А.А. Методы планирования ограждения опасностей для контроля в системах управления движением судна // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 3-1 (61). С. 110-119.
4. Гриняк В.М., Девятисильный А.С., Шуленина А.В. Моделирование схемы безопасного движения морской акватории // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 3-1(53). С. 127-134.
5. Довгоброд Г.М., Клячко Л.М. Упрощенное построение закона управления, обеспечивающего движение объекта по заданной криволинейной траектории // Гироскопия и навигация. 2011. № 3 (74). С. 24-33.
6. Корнев А.С., Хабаров С.П., Шпекторов А.Г. Формирование траекторий движения безэкипажного судна // Морские интеллектуальные технологии. 2021. Т. 1, № 4. С. 158-165.
7. Мироненко А.А. Методология формирования навигационной обстановки и программирования движений судна. Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф.Ушакова, 2016. 162 с.
8. Петров А.А. Алгоритмическое обеспечение информационно-управляющих систем адаптивных роботов // Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибер-ка. М.: ВИНТИ. 1987. Т. 21. С. 92-130.
9. Melzak Z.A., Forsyth J.S. Polyconics 1: Polyellipses and optimization // Quart. Appl. Math. 1977. Vol. 35. P. 239-255.