ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-467-480 **EDN BIKRYA**

VESSEL TRACKING BY LANDMARK BASES

A. S. Vas'kov[1], A. A. Mironenko[2]

[1] — Admiral Ushakov State Maritime University,
Novorossisk, Russian Federation
[2] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This work continues exploratory research aimed at improving methods using isolines of key navigation parameters traditionally applied in coastal navigation. The previously proposed idea of combining isolines for a single landmark base based on measured bearings and distances has been extended to multiple landmark bases, with tracking of four landmarks considered the basic option. Assuming the presence of irregular and regular measurement errors, regular errors are first compensated by transitioning to differential isolines in a general form. Next, the isolines or position line equations are presented in a reduced standard form and then solved using the least squares method. To compare different solutions, the accuracy of the obtained fixed position is estimated by the radial error. It is shown that regular errors are compensated when position lines are presented in a reduced standard form, but their reduction also allows compensating residual effects caused by the computational procedure. The most important findings of the research are visualized, and the main expressions are practically applied in the software of modern navigation systems. Simulation has shown that the radial error of the fixed vessel position, calculated from 26 reduced position lines presented in the standard form for four landmarks, is nearly twice less than the requirement for GNSS systems. Formalization of the proposed methods in state-of-the-art navigation systems and autonomous vessels will allow solving navigation information processing problems in coastal navigation at a new qualitative level.

Keywords: navigation parameter, range arc, isoazimuth, ellipse, hyperbola, position line, reduced standard form, least squares method, fixed position, radial error.

For citation:
Vas'kov, Anatoliy S., and A. A. Mironenko. "Vessel tracking by landmark bases." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-467-480.

УДК 656.61.052.4

КОНТРОЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА СОПРОВОЖДЕНИЕМ ПАР ОРИЕНТИРОВ

А. С. Васьков[1], А. А. Мироненко[2]

[1] — ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация
[2] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе продолжены поисковые изыскания в части совершенствования методов использования изолиний основных навигационных параметров традиционных для практического судовождения в условиях плавания вблизи берегов. Ранее предложенная идея комбинаций изолиний для одной пары навигационных ориентиров по измеренным пеленгам и дистанциям получила развитие на основе анализа нескольких пар ориентиров. В качестве базового варианта рассматривается сопровождение четырех ориентиров. В предположении общего случая наличия случайных и систематических погрешностей в измерениях вначале компенсируются возможные систематические погрешности переходом к разностным изолиниям, которые затем представляются в общем виде и производится их редуцирование. Далее для совместного решения избыточных уравнений линий положения методом наименьших квадратов они приводятся к нормальному виду, т. е. используются единые размерности.

Точность получаемых обсервованных координат для сравнения различных вариантов решения оценивается радиальной погрешностью. Показано, что в разностных линиях положения систематическая погрешность компенсируется, но редуцирование позволяет компенсировать их остаточное влияние, вызванное вычислениями. Важнейшие положения проведенного исследования визуализированы, а приводимые выражения доведены до формы практического применения в программном обеспечении современных систем навигации. Компьютерное моделирование показало, что радиальная погрешность координат обсервованного местоположения судна по 26 редуцированным линиям положения комбинаций пеленгов и дистанций четырех ориентиров практически в два раза меньше регламентированной для ГНСС. Формализация предлагаемых методов в современных навигационных комплексах и системах управления автономными судами позволит судоводителю решать задачи обработки навигационной информации в прибрежных районах плавания на качественно новом уровне.

Ключевые слова: навигационный параметр, изостадия, изопеленг, эллипс, гипербола, линия положения, редуцирование, метод наименьших квадратов, обсервованное место судна, радиальная погрешность.

Для цитирования:
Васьков А. С. Контроль движения судна сопровождением пар ориентиров / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 467–480. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-467-480. — EDN BIKRYA.

Введение (Introduction)

В исследовании [1] приводится детальный анализ сопровождения одной пары навигационных ориентиров с характерными параметрами базы (направление и дистанция между ориентирами) при помощи РЛС – САРП. По мнению авторов исследований [1, 2], предлагаемая реализация обеспечит более надежное опознание навигационных ориентиров ввиду уникальности параметров каждой отдельной базы в конкретном районе плавания, а следовательно, всей навигационной обстановки в целом, а также непрерывное получение избыточного количества навигационных параметров (НП) для целей оперативного контроля процесса движения судна по программной траектории (ПТ). Одномоментное совместное измерение пеленгов и дистанций одной пары навигационных ориентиров техническими средствами судовождения (ТСС) при их автоматическом сопровождении позволяет получить семь избыточных изолиний для определения высокоточного обсервованного места судна (ОМС).

Целью исследования является анализ возможности одновременного применения нескольких пар навигационных ориентиров для контроля движения судна и определения координат ОМС.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Уравнения избыточных изолиний, а также градиенты навигационных параметров в системе прямоугольных координат с центром в базе ориентиров имеют вид [1, 3–7]:

1. Изолиний окружностей (изостадии по обсервованным дистанциям, и изогона по разности двух измеренных пеленгов):

$$x_i^2 + y_i^2 = R_i^2;\ R_i = (D_1, D_2) = \text{const};$$

$$\tau_D = \Pi_{1,2} \pm 180°;\ g_D = 1; \tag{1}$$

$$\gamma = \left|\Pi_1 - \Pi_2\right| = \text{const};\ R = \frac{d}{2\sin\gamma};\ g_\gamma = 57{,}3\frac{d}{D_1 D_2};\ \tau_\gamma = \Pi_1 + \text{arctg}\frac{D_2 - D_1\cos\gamma}{D_2\sin\gamma}, \tag{2}$$

где D_1, D_2, d — обсервованные дистанции и базовое расстояние, мили;

x_i, y_i; R — прямоугольные координаты ориентиров и радиус окружности, мили;

Π_1, Π_2, γ — обсервованные пеленги, горизонтальный угол между ориентирами;

τ_D, τ_γ, g_D, g_γ — направления и модули соответствующих градиентов.

2. Изолинии прямых пеленгов — изопеленги: $\Pi_i = (\Pi_1, \Pi_2) = \text{const}$:

$$\Pi_i = \text{arctg}\frac{y_i - y_c}{x_i - x_c} = \text{const};\ g_{n(1,2)} = \frac{57{,}7°}{D_{1,2}},\ [°/\text{мили}];\ \tau_{n(1,2)} = \Pi_i - 90°, \tag{3}$$

где x_c, y_c — прямоугольные счислимые координаты судна (СМС), мили;

$\tau_{п(1,2)}$; $g_{п(1,2)}$ — направления и модули градиентов пеленгов, °, °/мили.

3. Изолиния разности дистанций – гипербола – $\Delta D = D_1 - D_2 = \text{const}$:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1;\ a = \frac{\Delta D}{2} = \text{const};\ b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2};$$

$$\tau_{\Delta D} = \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{2} \pm 90°;\ g_{\Delta D} = \left| 2\sin\frac{\Pi_1 - \Pi_2}{2} \right|, \quad (4)$$

где a, b — действительная и мнимая полуоси гиперболы;

$\tau_{\Delta D}$, $g_{\Delta D}$ — направление и модуль градиента разности дистанций, °.

4. Изолиния суммы дистанций – эллипс – $\Sigma D = D_1 + D_2 = \text{const}$:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1;\ a = \frac{D_1 + D_2}{2} = \text{const};\ b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}};$$

$$\tau_{\Sigma D} = \frac{\Pi_1 + \Pi_2}{2} \pm 180°;\ g_{\Sigma D} = \left| 2\cos\frac{\Pi_1 - \Pi_2}{2} \right|, \quad (5)$$

где a, b — большая и малая полуоси эллипса;

$\tau_{\Sigma D}$, $g_{\Sigma D}$ — направление и модуль градиента суммы дистанций, °.

В практическом судовождении неизбежные погрешности в измерениях навигационных параметров, а следовательно, и погрешности в изолиниях — линиях положения (ЛП) и в целом в обсервованных координатах принято уменьшать рациональным выбором пары ориентиров, при которой модули градиентов (1)–(5) принимают наибольшие значения, т. е. обеспечивают минимальные значения средней квадратической погрешности (СКП) ЛП [3–7]:

$$m_{\text{ЛП},i} = m_i / g_i,$$

где $m_{\text{ЛП}i}$, m_i — СКП ЛП и измерений.

Для градиентов горизонтального угла, пеленга и разности дистанций из (2)–(4) следует, что такому условию соответствует пара ориентиров, база которой ближе к позиции судна [3–7]. В то же время для градиента изолинии эллипса (5) при приближении базового угла к 180° модуль градиента стремится к нулю, возрастает СКП ЛП. Если рассматривать комбинации изолиний, то пересечение изолиний (ЛП) пеленгов и дистанций по каждому из ориентиров, а также ЛП софокусных эллипсов (5) и гипербол (4) находится всегда под углом 90°, что максимально уменьшает влияние погрешностей измерений НП на погрешности в координатах ОМС.

Анализ возможности одновременного применения нескольких пар навигационных ориентиров для контроля движения судна и определения координат ОМС обеспечит формирование не только ПТ, но и в единообразном подходе гарантированную полосу проводки (ГПП) в прибрежном плавании и стесненных водах в виде семейства кусочно-непрерывной последовательности изолиний НП, измеряемых современными ТСС. Единообразная концепция представления ПТ, ГПП и навигационных ориентиров может быть реализована в виде сложной обобщенной граф-модели [8], например, для ПТ и средств навигационного обеспечения (СНО) — рис. 1:

$$G_{\text{ПТ}} = (WP, S); \quad G_{\text{НО}} = (RP, B),$$

где $G_{\text{ПТ}}$ — граф ПТ;

WP — вершины графа ПТ — путевые точки, статуса (ТНП, ТКП, ТВЛ и т. п.);

S — ребра графа;

$G_{\text{ПТ}}$ — граф СНО;

RP — вершины графа СНО (навигационные ориентиры);

B — ребро графа СНО (параметры базы (направление и расстояние)).

Вершины графов — путевые точки с географическими координатами (φ, λ), по смыслу будут соответствовать точкам приложения силовых воздействий (винт, руль, буксиры), удерживающих судно на ПТ с плановой скоростью, компенсирующих воздействия внешних сил (ветер, течение

и т. п.), или точкам статуса начала и конца поворота (ТНП, ТКП), встречи лоцмана (ТВЛ), навигационным ориентирам, их виду (визуальному, радиолокационному и т. п.). Ребра графов будут представлять отрезки локсодромий ПТ, расстояния, а также кривые второго порядка, аппроксимирующие криволинейные участки ПТ или реализованные в виде сигмоподобных траекторных функций (СТФ) параметры баз ориентиров (направление, дистанция).

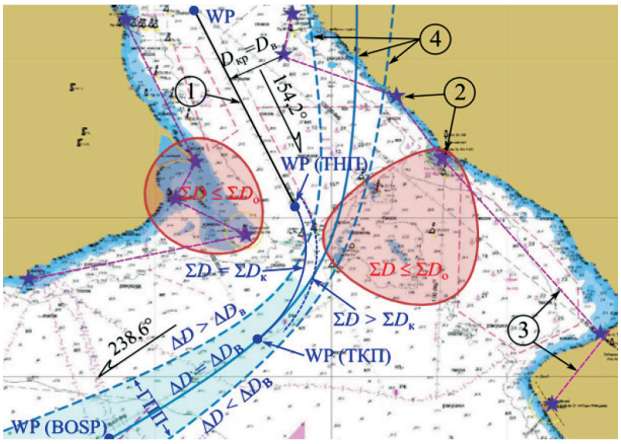

Рис. 1. Схема графов ПТ и используемых СНО:
1 — граф ПТ с вершинами *WP*, *WP* (ТНП), *WP* (ТКП) и ребрами *S*
(локсодромии с контролем по $D_{кр}$, *WP*(ТНП) – *WP*(ТКП) — поворот по дуге эллипса
с контролем по сумме дистанций $\Sigma D_к$, *WP* (ТНП) – WP (BOSP) — дуга гиперболы
выхода в ГПП с контролем по разности дистанций пар ориентиров $\Delta D_в$);
2 — навигационные ориентиры: визуальные, радиолокационные, створы и т. п. (вершины графа);
3 — базы ориентиров (ребра графа) в порядке открытия вдоль ПТ;
WP (*BOSP*) — путевая точка (начало морского перехода);
$D_в$, D_o, $D_{кр}$ — соответственно дистанции ведущие, ограждающие, кратчайшие;
4 — «неходовая» часть, ограниченная семейством гипербол

При планировании ПТ судоводителем вручную могут подбираться пары навигационных ориентиров, однако перспективное использование специальных программных приложений при условии их реализации и интегрирования в РЛС – САРП и *ECDIS* будет служить дополнительной поддержкой развития методов и средств судовождения перспективных морских автономных надводных судов (МАНС) в стесненных условиях плавания. Применение изолиний с постоянной и переменной кривизной позволит обеспечить не только оперативный контроль движения судна по криволинейным участкам ПТ с учетом угловой скорости поворота во взаимосвязи с линейной скоростью относительно грунта по запланированному радиусу кривизны ПТ, но и удержание его в пределах геометрии ограничений ГПП [9, 10].

Разности исходных НП (пеленгов и дистанций), косвенно образующих новые НП и соответствующие изолинии (изогону и гиперболу), позволяют непосредственно компенсировать постоянные систематические погрешности измерений исходных НП, а избыточность изолиний способствует уменьшению влияния случайных погрешностей.

При наличии в навигационной обстановке более двух ориентиров, которые можно взять на автосопровождение РЛС – САРП для контроля процесса движения судна по ПТ и получения ОМС может быть образовано несколько пар ориентиров. Например, сопровождение трех ориентиров (лучший вариант с позиций компенсации погрешностей при их расположении по всему горизонту) позволяет получить 15 избыточных изолиний:

1) шесть окружностей (по дистанциям — три изостадии и разностям пеленгов — горизонтальным углам между ориентирами — три изогоны);
2) три изопеленга — по пеленгам ориентиров;
3) три гиперболы — по разностям дистанций до двух ориентиров;

4) три эллипса, софокусные соответствующим гиперболам по суммам дистанций до двух ориентиров.

При измерении и сопровождении пеленгов и дистанций четырех ориентиров с наилучшим с позиций теории ОМС расположением по всему горизонту (рис. 2) образуется шесть пар ориентиров, что кратно увеличивает до 26 общее число прямых и косвенных изолиний (ЛП):

1) десять окружностей (по дистанциям — четыре изостадии и разностям пеленгов двух ориентиров — горизонтальным углам между ориентирами — шесть изогон);

2) по пеленгам ориентиров — четыре изопеленги;

3) по разностям дистанций до двух ориентиров — шесть гипербол;

4) по суммам дистанций до двух ориентиров — шесть эллипсов, софокусных соответствующим гиперболам.

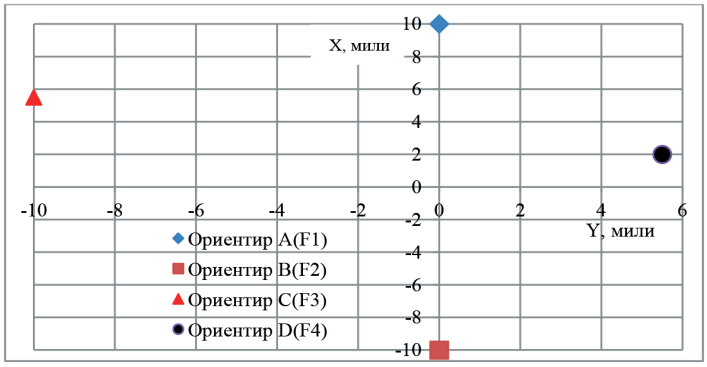

Рис. 2. Схема расположения навигационных ориентиров в системе прямоугольных координат: *A*(*F*1), *B*(*F*2), *C*(*F*3), *D*(*F*4) — ориентиры (соответствующие фокусы гипербол и эллипсов); *X*, *Y* — прямоугольные координаты ориентиров, мили

Кроме приведенных изолиний, известных в навигации [3–7], образованных по исходным измеренным пеленгам и дистанциям и их комбинациям, могут быть получены новые типы изолиний, в частности семейство многофокусных кривых (многофокусный эллипс и многофокусная гипербола [11–14]), позволяющих, например, точнее и подробнее аппроксимировать контуры навигационных опасностей и запретных районов произвольной кривизны в целях контроля безопасности плавания судна (рис. 3) [12].

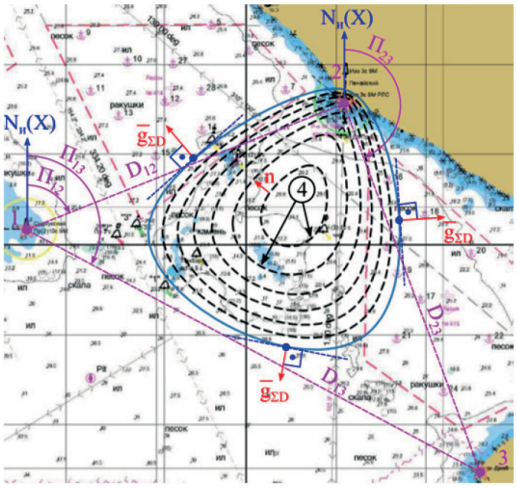

Рис. 3. Семейство изолиний трех фокусных эллипсов: *1–3* — навигационные ориентиры; $П_{ij}$, D_{ij} — параметры баз пар ориентиров (пеленги, дистанции); *n* — перенос изолинии; $g_{\Sigma D}$ — градиент НП суммы дистанций; *4* — изолинии суммы дистанций

Это позволит сохранить больше контролируемого свободного пространства для маневрирования судна:

$$\sum_{i=1}^{N}\sqrt{\left(x-x_{F_i}\right)^2+\left(y-y_{F_i}\right)^2}=\sum_{i=1}^{N}D_i=\text{const};$$

$$t_{\Sigma D}=\text{arctg}\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}\sin\tau_i}{\sum_{i=1}^{k}\cos\tau_i}\right);\ \ g_{\Sigma D}=\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{k}\sin\tau_i\right)^2+\left(\sum_{i=1}^{k}\cos\tau_i\right)^2},$$

где x_{Fi}, y_{F2} — координаты фокусов N-фокусного эллипса (координаты ориентиров);

N — количество (число) ориентиров;

D_i — дистанция от позиции судна (обсервованные) до соответствующего (i-го) ориентира;

$\tau_{\Sigma D}$, $g_{\Sigma D}$ — направление и модуль градиента для N-фокусного эллипса.

Для определения места судна по избыточным изолиниям (ЛП) целесообразно применять программные приложения к РЛС – САРП или *ECDIS*, которые могут быть реализованы на основе обобщенного метода линий положения и метода наименьших квадратов (МНК) [3–7, 15].

При гипотезе присутствия в сопровождаемых пеленгах и дистанциях как случайных, так и систематических погрешностей (соответствует наиболее общему случаю) целесообразно вначале раздельно обрабатывать однородные по типу НП уравнения ЛП редуцированием коэффициентов их средними арифметическими значениями для компенсации и учета систематических погрешностей в последующих измерениях с помощью полученных поправок [1, 4, 16]. Для данной операции исходные уравнения ЛП следует представить в общем виде, чтобы исключить влияние разных по модулю градиентов на измеренные и счислимые значения НП:

$$a_i\Delta x+b_i\Delta y=\Delta U_i+V_i+\sigma;\ \ \Delta U_i=U_{oi}-U_{ci};$$

$$a_i=g_i\cos\tau_i;\ \ b_i=g_i\sin\tau_i; \tag{6}$$

$$\frac{\sum_i^n a_i}{n}\Delta x+\frac{\sum_i^n b_i}{n}\Delta y-\frac{\sum_i^n\Delta U_i}{n}=\frac{\sum_i^n\sigma}{n}=\sigma;\ \ \Delta\text{НП}=-\sigma; \tag{7}$$

$$\left(a_i-\frac{\sum_i^n a_i}{n}\right)\Delta x+\left(b_i-\frac{\sum_i^n b_i}{n}\right)\Delta y=\left(\Delta U_i-\frac{\sum_i^n\Delta U_i}{n}\right)+V_i; \tag{8}$$

$$g_i=\sqrt{\left(a_i-\frac{\sum_i^n a_i}{n}\right)^2+\left(b_i-\frac{\sum_i^n b_i}{n}\right)^2};\ \ \tau_i=\text{arctg}\left(\left(b_i-\frac{\sum_i^n b_i}{n}\right)/\left(a_i-\frac{\sum_i^n a_i}{n}\right)\right), \tag{9}$$

где Δx, Δy — поправки к координатам СМС для получения ОМС;

a_i, b_i — коэффициенты однородных уравнений ЛП общего вида;

ΔU_i — разности обсервованных и счислимых значений НП;

U_{oi}, U_{ci} — обсервованные и счислимые значения НП;

g_i, τ_i — модули и направления градиентов редуцированных уравнений ЛП (8);

V_i — вероятнейшие случайные погрешности НП;

σ — повторяющаяся систематическая погрешность однородных НП, подлежащая компенсации;

n — количество однородных уравнений ЛП;

ΔНП — поправка соответствующих НП для исправления последующих измерений.

Несмотря на то, что в изолиниях, образованных разностью сопровождаемых НП ориентиров (пеленгов и дистанций), т. е. изогон и гипербол, компенсируется влияние постоянных систематических погрешностей исходных измерений [3–7], уравнения этих изолиний также целесообразно редуцировать для компенсации возможных постоянных остаточных погрешностей и вычислений. После этого редуцированные уравнения (РЛП) (8) с помощью их градиентов (9) представляются в нормальном виде для приведения единиц измерения исходных и косвенных НП к единой размерности (милям) при совместном решении всех уравнений ЛП по семейству пар ориентиров [3–7]:

$$\Delta x\cos\tau_i + \Delta y\sin\tau_i = l_i + V_i;\ l_i = \Delta U_i / g_i, \tag{10}$$

где l_i — смещения ЛП относительно СМС, мили.

После применения МНК к системе всех n-уравнений ЛП (10) пар ориентиров (для трех пар ориентиров n = 17, для четырех — n = 26) получается система двух нормальных уравнений (НЛП) для определения двух вероятнейших поправок к СМС и расчета координат ОМС, например, по правилу Крамера:

$$\left.\begin{aligned} A_1\Delta x + B_1\Delta y = L_1;\\ A_2\Delta x + B_2\Delta y = L_2; \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

$$A_1 = \sum_{i=1}^{n} P_i\cos^2\tau_i;\ \ B_1 = A_2 = \sum_{i=1}^{n} P_i\sin\tau_i\cos\tau_i;\ \ B_2 = \sum_{i=1}^{n} P_i\sin^2\tau_i;$$

$$L_1 = \sum_{i=1}^{n} P_i l_i\cos\tau_i;\ \ L_2 = \sum_{i=1}^{n} P_i l_i\sin\tau_i;\ \ P_i = m_{\text{ЛП}_i}^{-2}; \tag{12}$$

$$\Delta x = \frac{B_2L_1 - B_1L_2}{\Delta};\quad \Delta y = \frac{A_1L_2 - A_2L_1}{\Delta};\ \ \Delta = A_1B_2 - A_2B_1; \tag{13}$$

$$x_0 = x_c + \Delta x;\ \ y_0 = y_c + \Delta y,$$

где A_i, B_i, L_i — коэффициенты НЛП (11);

n, P_i — общее количество ЛП (10) по парам ориентиров, их вес;

x_0, y_0 — прямоугольные координаты ОМС, мили.

Радиальная СКП вероятнейшего ОМС оценивается через СКП ЛП с единичным весом, полученным по вероятнейшим поправкам относительно координат ОМС (10) после их определения (13), согласно следующему выражению:

$$\mathrm{M_o} = m_1\sqrt{\frac{A_1 + B_2}{\Delta}} = m_1\sqrt{\frac{\sum P_i}{\Delta}};\ m_1 = \sqrt{\frac{\sum P_i\left(l_i - \Delta x\cos\tau_i - \Delta y\sin\tau_i\right)^2}{n-2}}, \tag{14}$$

где m_1 — СКП ЛП с единичным весом.

Решения системы уравнений (11)–(13) могут быть представлены в векторно-матричной форме [1, 4, 17–19], элементы которых формируются из составляющих исходных уравнений ЛП (10), что позволяет также исключить возможные проблемы, если главный определитель системы (13) равен нулю:

$$PA\Delta X = PL;\ \Delta X = \left(A^{\mathrm{T}}PA\right)^{-1}A^{\mathrm{T}}P^{-1}L; \tag{15}$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix}\Delta x\\ \Delta y\end{bmatrix};\ A^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix}\cos\tau_1\cos\tau_2\ldots\cos\tau_n\\ \sin\tau_1\sin\tau_n\ldots\sin\tau_n\end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix}\cos\tau_1 & \sin\tau_1\\ \cos\tau_2 & \sin\tau_2\\ \ldots & \ldots\\ \cos\tau_n & \sin\tau_n\end{bmatrix};\ L = \begin{bmatrix}l_1\\ l_2\\ \ldots\\ l_n\end{bmatrix};\ P = \begin{bmatrix}1/m_{\text{ЛП}_1}^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1/m_{\text{ЛП}_2}^2 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1/m_{\text{ЛП}_n}^2\end{bmatrix},$$

где ΔX — матрица-столбец искомых неизвестных (Δx, Δy);

A, A^{T} — матрица коэффициентов ЛП (10) и транспонированная матрица;

L — матрица-столбец переносов ЛП (10);

P, P^{-1} — прямая и обратная матрицы весов ЛП (15).

Оценка точности полученных координат ОМС (15) производится на основе анализа ковариационной матрицы погрешностей измеренных НП при условии «усечения» ее до размерности до двух НЛП (2 × 2), вне зависимости от количества НП, а именно [18]:

$$N = \left(A^{\mathrm{T}} P A\right)^{-1};\ N = \begin{pmatrix} n_{11} & n_{12} \\ n_{21} & n_{22} \end{pmatrix};\ n_{11} \equiv m_{\Delta\varphi}^2;\quad n_{22} \equiv m_{\Delta w}^2, \tag{16}$$

где N — ковариационная матрица погрешностей;

n_{11}, n_{22} — дисперсии СКП широты и отшествия для ОМС соответственно;

$n_{12} = n_{21}$ — ковариационные моменты.

По главной диагонали ковариационной матрицы в (16) находятся дисперсии координат ОМС по измеряемым НП, вне главной диагонали — ковариационные моменты, характеризующие связь между измерениями НП. Геометрическая интерпретация ковариационной матрицы в (16) для двумерного случая (плоскости) определяет основные параметры эллипса погрешностей: главные полуоси и углы ориентации. Для рассматриваемой ковариационной матрицы существуют собственные векторы, определяющие направления главных полуосей эллипса погрешностей (направления действия максимальной и минимальной погрешностей), а собственные числа (модули собственных векторов) максимальное и минимальное значения дисперсий. Собственные числа ковариационной матрицы в данном случае находятся на основе решения ее характеристического уравнения:

$$Nz = \zeta;\quad \zeta = \frac{n_{11} + n_{22} \pm \sqrt{\left(n_{11} - n_{22}\right)^2 + 4n_{12}^2}}{2};\quad \Psi = \begin{pmatrix} \cos\psi \\ \sin\psi \end{pmatrix};$$
$$\zeta_{\max} = m_{\text{ЛП}\max}^2;\quad \zeta_{\min} = m_{\text{ЛП}\min}^2, \tag{17}$$

где Ψ — вектор, определяющий составляющие направления собственного вектора (проекции на координатные оси (X — меридиан, Y — параллель на рис. 2);

ψ — направление собственного вектора в круговом счете, относительно меридиана (оси X);

ζ — собственное число ковариационной матрицы в (16).

Подстановка элементов ковариационной матрицы погрешностей координат ОМС (16) в (17) дает собственные числа, а именно наибольшее значение дисперсии при знаке «+» и наименьшее значение дисперсии при знаке «–». Тогда полуоси среднеквадратического эллипса погрешностей (a, b) — рис. 4 (максимальная и минимальная среднеквадратические погрешности в ОМС) — определяются квадратными корнями из дисперсий, т. е. соответствующих собственных чисел:

$$a = \sqrt{\zeta_{\max}};\ b = \sqrt{\zeta_{\min}}. \tag{18}$$

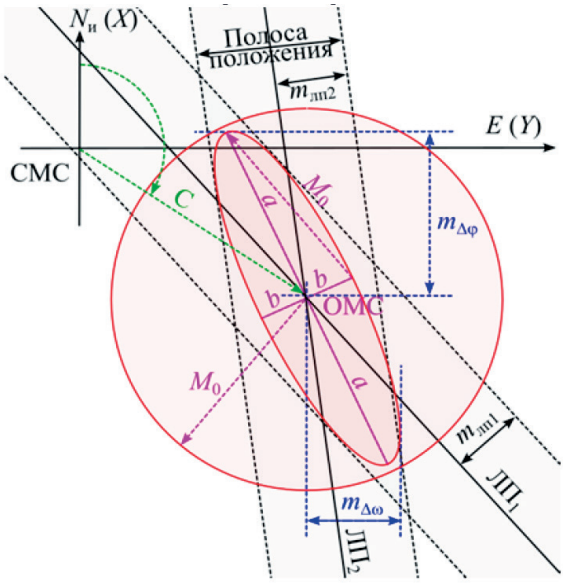

Рис. 4. Среднеквадратический эллипс погрешностей и радиальная СКП ОМС

Направление собственных векторов (полуосей эллипса погрешностей) получается взаимным преобразованием выражений (18) с учетом составляющих ковариационной матрицы погрешностей (17):

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{\zeta - n_{11}}{n_{12}}. \tag{19}$$

Радиальная СКП ОМС (M_o) рассчитывается как корень квадратный из следа ковариационной матрицы (17) либо с помощью СКП по широте и отшествию ОМС (16), либо с помощью найденных главных полуосей эллипса погрешностей (18) — см. рис. 4:

$$M_o = \sqrt{n_{11} + n_{22}} = \sqrt{m_{\Delta\varphi}^2 + m_{\Delta w}^2} = \sqrt{a^2 + b^2}. \tag{20}$$

Таким образом, системы уравнений (11)–(14) и (15)–(20) дают эквивалентные результаты (координаты) ОМС и радиальные СКП. Различие заключается в форме математического представления одной и той же задачи ОМС с оценкой точности, а также возможностей программной реализации в зависимости от вычислительных устройств.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Работоспособность методов и алгоритмов апробировалась компьютерным моделированием, для этого производилась обработка избыточных НП пар четырех ориентиров, координаты которых снимались с плана (планшета) — см. рис. 2 — и уточнялись решением соответствующих локсодромических треугольников. СКП принимались по априорным статистическим данным [1, 18, 19]. Исходные данные сведены в таблицу.

Исходные данные определения вероятнейших координат ОМС судна по совместным парам четырех ориентиров

Пара ориентиров	Пеленг, °		Дистанция, мили		Угол, °		ΔD, мили		ΣD, мили		База, мили	Координаты, мили	
	Π_i	$m_п$	D_i	m_D	γ	m_γ	ΔD	$m_{\Delta D}$	ΣD	$m_{\Sigma D}$	d	x	y
A (F_1)	45,0	0,5	5,66	0,015	121,0	0,7	10,83	0,02	22,15	0,02	20,00	10,00	0,00
B (F_2)	166,0		16,49									–10,00	0,00
A (F_1)	45,0		5,66		139,7		0,36		11,68		10,96	10,00	0,00
C (F_3)	265,2		6,02									5,5	–10,0
A (F_1)	45,0		5,66		67,9		4,64		15,96		9,71	10,00	0,00
D (F_4)	112,8		10,30									2,00	5,50
B (F_2)	166,0		16,49		99,3		10,48		22,52		10,96	–10,00	0,00
C (F_3)	265,2		6,02									5,5	–10,0
B (F_2)	166,0		16,49		53,1		6,20		26,80		13,20	–10,00	0,00
D (F_4)	112,8		10,30									2,00	5,50
C (F_3)	265,2		6,02		152,4		4,28		16,32		15,89	5,5	–10,0
D (F_4)	112,8		10,30									2,00	5,50
СМС	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	6,00	–4,00

Для сопоставления и анализа на планшете (рис. 5) приведены результаты компьютерного моделирования для определения вероятнейших координат ОМС при различных сочетаниях НП, графики значений радиальных погрешностей ОМС показаны на рис. 6, что позволяет сделать выводы, характерные для различных сочетаний ЛП.

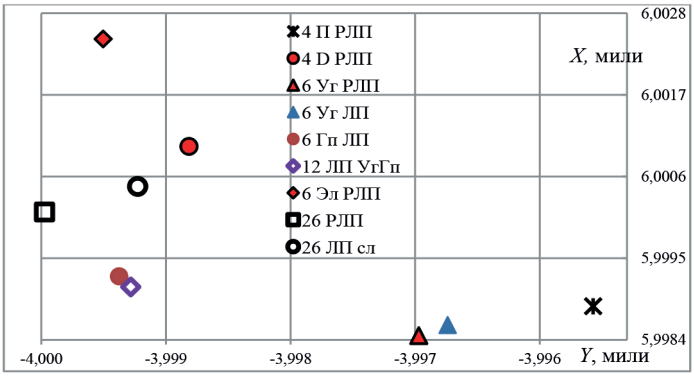

Рис. 5. Результаты определения вероятнейших координат ОМС
по сочетаниям НП пар четырех ориентиров, расположенных по всему горизонту:
П — пеленги; D — дистанции; $У_г$ — горизонтальные углы;
Гп — разности дистанций (изолинии гиперболы);
Эл — суммы дистанций (изолинии эллипсы); ЛП — исходные ЛП в нормальном виде;
РЛП — ЛП после редуцирования в нормальном виде;
$ЛП_{сл}$ — исходные ЛП в нормальном виде при гипотезе только случайных погрешностей

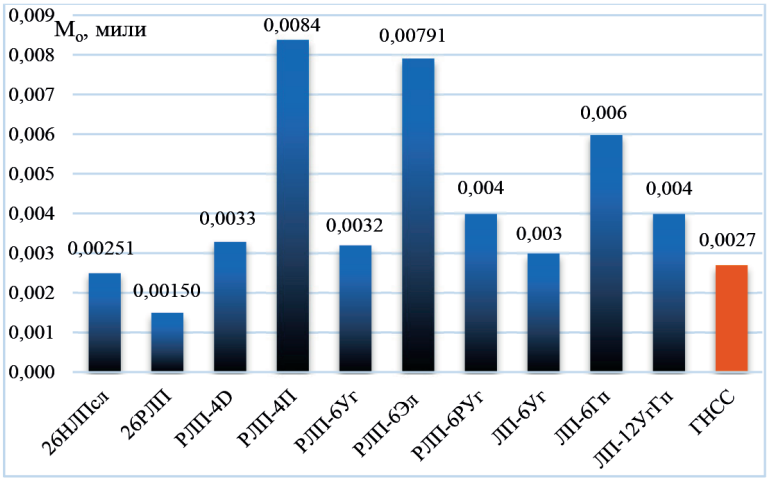

Рис. 6. Радиальные СКП вероятнейших координат ОМС
по сочетаниям НП пар четырех ориентиров

Значения вероятнейших координат ОМС, полученных по одной итерации возможных 26 РЛП, практически совпадают с исходным местом ($X = 6$, $Y = –4$), из которого снимались с карты (измерялись и для контроля рассчитывались) НП (пеленги и дистанции) ((26 РЛП на рис. 5 и 6, $М_о = 0{,}0015$ мили). Систематические погрешности моделировались в пределах ±1 миля по дистанции и ±2° по пеленгу, что показывает состоятельность применения метода РЛП для их компенсации в измеренных НП. Значения вероятнейших координат ОМС по одной итерации 26 ЛП при гипотезе отсутствия систематических и наличия только случайных погрешностей близки к исходному месту ($X = 6$, $Y = –4$) (26 ЛПсл на рис. 5 и 6, $М_о = 0{,}00251$ мили). Это также подтверждает возможность уменьшения влияния случайных погрешностей измерений НП при правильном выборе расположения ориентиров, т. е. по всему горизонту (практически в противоположных азимутах) [1, 18, 19].

Влияние методов редуцирования на обработку разностных ЛП (дистанций и пеленгов) с целью компенсации систематических погрешностей в измерениях НП (в разностях они компенсируются) приведены для сравнения значений вероятнейших координат ОМС по горизонтальным углам (6 УгЛП, 6 УгРЛП на рис. 5, 6 УгЛП на рис. 6, $М_о = 0{,}003$ мили, $6У_гРЛП$, $М_о = 0{,}0032$ мили),

которые практически совпадают. Это показывает целесообразность и состоятельность применения разностных ЛП для компенсации систематических погрешностей измерений различных НП. Для сравнения также представлены отдельно вероятнейшие координаты ОМС по 12 разностным ЛП без редуцирования (разностей дистанций — гипербол и пеленгов — горизонтальных углов) (12 УгГп на рис. 5, 12 ЛП УгГп на рис. 6, M_o = 0,004 мили), которые близки к ОМС по 26 $ЛП_{сл}$ и 26 РЛП, что подтверждает эффективность использования разностных ЛП.

Радиальная СКП вероятнейшего ОМС получается наименьшей по 26 РЛП (см. рис. 6 26 РЛП, M_o = 0,0015 мили), но наибольшей по четырем РЛП пеленгов (4РЛП на рис. 6, M_o = 0,0084 мили) по сравнению с ОМС по горизонтальным углам, полученным по разностям значений пеленгов, из-за значений модулей их градиентов.

Результаты моделирования с использованием различных вариантов редуцирования исходных ЛП для компенсации систематических погрешностей и их оценки по выражениям (7) позволяют контролировать их наличие и компенсировать в последующих измерениях НП с помощью полученной поправки.

Вероятнейшие ОМС по пеленгам (4 П РЛП) и горизонтальным углам (6 $У_г$ РЛП, 6 $У_г$ ЛП) в большей степени отличаются от вероятнейших ОМС, полученных по различным вариантам 26 ЛП (26 $ЛП_{сл}$, 26 РЛП) относительно исходного места, взятого за истинное, и имеют большие радиальные погрешности из-за исходных погрешностей измерений НП и их градиентов.

По сравнению с гарантированной точностью ГНСС, в соответствии с Резолюцией IMO[1] для стесненных условий плавания, включая портовые воды (10 м (0,0054 мили) с вероятностью 95 % или СКП = 0,0027 мили), полученные вероятнейшие ОМС по 26 ЛП являются более точными, остальные — равнозначными, за исключением ОМС по пеленгам (РЛП-4П, РЛП-6Эл) — см. рис. 6.

Результаты компьютерного моделирования определения вероятнейших координат ОМС в различных сочетаниях НП с наихудшим расположением пар четырех ориентиров с одной стороны горизонта при тех же исходных координатах СМС (X = 6, Y = –4) для сравнения показаны на планшете рис. 7.

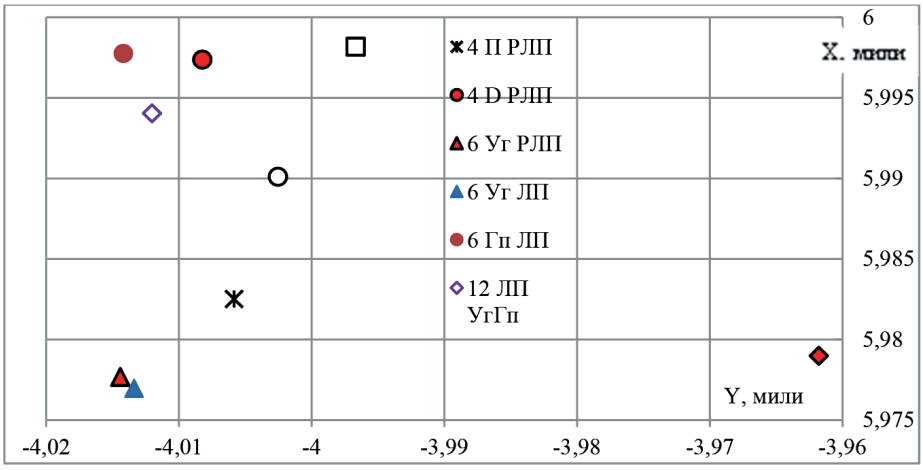

Рис. 7. Результаты определения вероятнейших координат ОМС по сочетаниям НП пар четырех ориентиров, расположенных с одной стороны горизонта

В данном случае процедуры редуцирования исходных уравнений ЛП также позволяют компенсировать систематические погрешности измерений НП в вероятнейших координатах ОМС по 26 РЛП (см. рис. 6). Радиальные СКП вероятнейших ОМС для различных комбинаций ОМС получаются аналогичными. Частные вероятнейшие ОМС, связанные с измеряемыми дистанциями и их разностями ближе к ОМС по всем 26 РЛП, в отличие от вариантов ОМС, связанных с измерениями пеленгов и их разностей, можно объяснить малыми значениями горизонтальных углов ввиду

[1] Resolution IMO A.1046(27) Worldwide radio navigation system / Adopted on 30 November 2011 (Agenda item 9).

специально смоделированного расположения навигационных ориентиров. Вероятнейшие координаты ОМС по РЛП суммы дистанций (эллипсов) в данном случае имеют значительное расхождение по отношению ко всем другим вариантам ОМС, хотя радиальная СКП ОМС аналогична предыдущему случаю. Это можно объяснить накоплением систематических погрешностей НП при суммировании дистанций, которые недостаточно компенсируются редуцированием исходных уравнений ЛП при расположении ориентиров с одной стороны горизонта.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реализация в современных ТСС: РЛС – САРП и *ECDIS* в виде дополнительного программного обеспечения принципов автоматического сопровождения и одномоментного измерения навигационных параметров (пеленгов и дистанций) пар ориентиров позволяет однозначно опознавать эти ориентиры по уникальным параметрам базы (см. рис. 3), в отличие от использования только одного ориентира, получая высокоточные координаты обсервованного местоположения.

2. Одновременное использование пар трех ориентиров с измерением и сопровождением пеленгов и дистанций дает 17 ЛП, четырех — 26 ЛП, что по сравнению с одной парой ориентиров дает лучшее расположение изолиний (ЛП) относительно опасностей и ПТ судна и, соответственно, повышает точность и надежность ОМС, а также безопасность плавания.

3. Компьютерное моделирование показывают хорошие результаты компенсации систематических погрешностей измерений НП и высокую точность по сравнению с требованиями к ОМС ГНСС (см. рис. 4) вероятнейших координат ОМС при любом расположении ориентиров относительно судна.

4. Для одновременного использования исходных НП (пеленгов и дистанций), а также косвенных НП (разностей или сумм исходных НП) в качестве ведущих, контрольных и ограждающих ЛП в соответствии с конкретным участком ПТ и навигационными условиями плавания следует разработать специальные схемы выбора пар ориентиров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васьков А. С.* Комбинации изолиний пеленгов и дистанций пары навигационных ориентиров для определения обсервованного места судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950. — EDN LUDOMV.

2. *Афанасьев Б. В.* Распознавание радиолокационных объектов с использованием внутренней геометрии полигона ориентиров / Б. В. Афанасьев, В. В. Афанасьев, С. С. Губернаторов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16. — EDN EOKKQV.

3. *Песков Ю. А.* Эволюция систем и методов морской радионавигации и связи для мониторинга движения судов / Ю. А. Песков // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2014. — № 2(7). — С. 42–44. — EDN QQBXKF.

4. *Васьков А. С.* Метод решения уравнений изостадий / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 2. — С. 212–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-212-223. — EDN KWZKSV.

5. *Груздев Н. М.* Оценка точности морского судовождения / Н. М. Груздев — М.: Транспорт, 1989. — 191 с.

6. *Санаев А. И.* Аналитическое определение места судна в прибрежной зоне / А. И. Санаев, В. И. Меньшиков, М. А. Пасечников // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. — 2002. — Т. 5. — № 2. — С. 195–202. — EDN IIYBSF.

7. Практическое кораблевождение: для командиров кораблей, штурманов и вахтенных офицеров. Книга первая / Под ред. А. П. Михайловского. — СПб.: ГУНиО, 1889. — 896 с.

8. *Мироненко А. А.* Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна: диссертация на соискание ученой степени д-ра техн. наук;

специальность 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / Мироненко Александр Анатольевич; ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова. — Новороссийск, 2016. — 310 с. — EDN KUKJFE.

9. *Васьков А. С.* Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415. — DN THCPAH.

10. *Васьков А. С.* Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836. — EDN PLVFQU.

11. *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 OOIIQL.

12. *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.

13. *Ракчеева Т. А.* Фокусная аппроксимация гладких геометрических форм / Т. А. Ракчеева // Актуальные научные проблемы прикладных и естественных наук: Сборник научных трудов кафедры прикладной математики и программирования. — Москва: ФГОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», 2018. — С. 188–202. — EDN RZZLJR.

14. *Melzak Z. A., Forsyth J. S.* Polyconics 1. Polyellipses and optimization / *Z. A. Melzak, J. S Forsyth* // Quarterly of Applied Mathematics. — 1977. — Vol. 35. — Pp. 239–255.

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

16. *Родионов А. И. Сазонов А. Е.* Автоматизация судовождения / А. И. Родионов, А. Е. Сазонов. — М.: Транспорт, 1992. — 192 с.

17. *Ефимов И. В.* К вопросу об автоматизации определения места судна и оценки его точности / И. В. Ефимов, В. В. Касьянов // Морской вестник. — 2015. — № 3(55). — С. 67–71. — EDN UGCXBH.

18. *Логиновский В. А.* Оценка вероятности нахождения места судна в геометрической фигуре погрешностей линий положения / В. А. Логиновский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171. — EDN LALHQH.

19. *Логиновский В. А.* Оценка точности определения координат места судна по измерениям в реальном масштабе времени / В. А. Логиновский // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346. — EDN DDNVHE.

REFERENCES

1. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The bearings and distances isolines combinations of the navigational landmarks pair for the vessel fixed position determination." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 941–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-941-950.

2. Afanas'ev, B. V., V. V. Afanas'ev and S. S. Gubernatorov. "Identification of the radar conspicious objects using the internal geometry of the charted landmarks polygon." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 13.1 (2021): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-1-7-16.

3. Peskov, Yu. A. "Evolution of maritime radionavigation and comunications systems for monitoring of shipping." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 2(7) (2014): 42–44.

4. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "Method for solving the isostage equations." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.2 (2024): 212–223. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-2-212-223.

5. Gruzdev, N. M. *Identification of the radar conspicious objects using the internal geometry of the charted landmarks polygon* M.: Transport, 1989: 191.

6. Sanaev, A. I., V. I. Men'shikov and M. A. Pasechnikov. "Analiticheskoe opredelenie mesta sudna v pribrezhnoy zone." *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 5.2 (2002): 195–202.

7. Prakticheskoe korablevozhdenie: dlya komandirov korablej, shturmanov i vahtennyh oficerov. Kniga pervaya. Pod red. A. P. Mihajlovskogo. SPb.: GUNiO, 1889.

8. Mironenko, A. A. Metodologiya formalizatsii navigatsionnoy obstanovki, planirovaniya marshruta i programmnykh traektoriy dvizheniya sudna. Grand PhD diss. Novorossijsk, 2016, 310 p.

9. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "Planning and control of the ship curvilinear route." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

10. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The ship motion control by navigational parameters and parallel indexes." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.

11. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The methods for planning no-go area clearing lines in the vessel's control systems." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 3–1(61) (2023): 110–119. DOI: 10.37220/MIT.2023.61.3.036.

12. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "The multifocal ellipse ship's domain model." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 4–1(66) (2024): 259–266. DOI: 10.37220/MIT.2024.66.4.031.

13. Rakcheeva, T. A. "Fokusnaya approksimatsiya gladkikh geometricheskikh form." *Aktual'nye nauchnye problemy prikladnykh i estestvennykh nauk: Sbornik nauchnykh trudov kafedry prikladnoy matematiki i programmirovaniya* Moskva: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Rossiyskiy gosudarstvennyy universitet imeni A. N. Kosygina (Tekhnologii. Dizayn. Iskusstvo)», 2018: 188–202.

14. Melzak Z. A. and J. S. Forsyth "Polyconics 1. Polyellipses and optimization." *Quarterly of Applied Mathematics* 35 (1977): 239–255.

15.Kavrayskiy, V. V. *Izbrannye trudy.T.I:* Astronomiya i geodeziya M: Izd. UNGS VMF, 1956: 358.

16. Rodionov, A. I. and A. E. Sazonov. Avtomatizatsiya sudovozhdeniya. M: Transport, 1992: 192.

17. Efimov, I. V. and V. V. Kas'yanov. "K voprosu ob avtomatizatsii opredeleniya mesta sudna i otsenki ego tochnosti." *Morskoy Vestnik* 3(55) (2015): 67–71.

18. Loginovskiy, V. A. "Assessment of ship position probability in the geometrical figure of position lines errors." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 161–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-161-171.

19. Loginovskiy, V. A. "Assessing the accuracy of ship position through real-time measurements." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 335–346. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-335-346.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васьков Анатолий Семёнович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
353922, Российская Федерация, г. Новороссийск, пр. Ленина, 93
e-mail: *as.vaskov@mail.ru*

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*, *kaf_nav@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vas'kov, Anatoliy S. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Ushakov State Maritime University
93 Lenin Av., Novorossisk, 353918, Russian Federation
e-mail: *as.vaskov@mail.ru*

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*, *kaf_nav@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 мая 2025 г.
Received: May 15, 2025.