

statistical data and expert assessments, authors identify the most effective strategies for minimizing risks associated with natural factors and evaluate their economic feasibility. A detailed analysis of the impact of adaptation measures on operating costs and overall maritime transport safety is conducted. The paper also suggests comprehensive approach to solving the problem of maritime transport adaptation, taking into account technical, organizational, and economic aspects, including environmental safety and personnel training issues. Legal mechanisms for ensuring maritime transport safety and the role of international cooperation in the development of industry standards are examined. Promising directions for further research in the field of increasing maritime transport resilience to natural challenges are outlined, particularly the development of new shipbuilding materials, improvement of weather forecasting systems, and development of autonomous control systems.

Keywords: maritime transport, natural factors, vessel adaptation, navigation safety, climate change, meteorological systems, navigation technologies, shipbuilding, maritime infrastructure, environmental safety.

УДК 629.5.052.3

doi.org/10.33298/2226-8553.2024.3.41.05

Калініченко Є.В.

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШЛЯХОМ МІНІМІЗАЦІЇ ДИСПЕРСІЇ ПОГРІШНОСТІ ОБСЕРВАЦІЇ

У статті розглядається метод підвищення енергоефективності судна шляхом мінімізації дисперсії погрішності обсервації з використанням ортогонального розкладання щільності розподілу погрішностей навігаційних вимірювань. В сучасних умовах експлуатації морського транспорту особливої актуальності набуває задача підвищення енергоефективності суден. Одним із важливих факторів, що впливають на енергоефективність, є точність визначення місця судна. Неточності в обсервації призводять до відхилень від оптимального маршруту та, як наслідок, до збільшення витрат палива. Тому розробка методів підвищення точності обсервації є актуальною науково-практичною задачею. Запропоновано використання системи рівнянь правдоподібності з урахуванням ортогонального розкладання щільності для підвищення точності визначення координат судна. Проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованого методу з методом найменших квадратів для випадків розподілу погрішностей за змішаним законом першого та другого типу. Результати досліджень показують, що запропонований метод забезпечує вищу ефективність визначення координат судна порівняно з методом найменших квадратів. Отримані результати дозволяють суттєво підвищити точність визначення місця судна та, як наслідок, покращити його енергоефективність за рахунок зменшення відхилень від оптимального маршруту.

Запропонований метод визначення координат судна з використанням ортогонального розкладання щільності розподілу погрішностей забезпечує вищу ефективність порівняно з методом найменших квадратів. При цьому для обох типів змішаних законів розподілу погрішностей досягається практично повна ефективність (близька до 1) вже при $n \geq 4$. Зменшення дисперсії погрішності обсервації дозволяє підвищити точність визначення місця судна та, як наслідок, покращити його енергоефективність.

Ключові слова: енергоефективність, обсервація, ортогональне розкладання, погрішність вимірювань, навігаційні параметри, лінії положення.

Постановка проблеми. В сучасних умовах експлуатації морського транспорту особливої актуальності набуває задача підвищення енергоефективності суден [1, 2]. Одним із важливих факторів, що впливають на енергоефективність, є точність визначення місця судна [3]. Неточності в обсервації призводять до відхилень від оптимального маршруту та, як наслідок, до збільшення витрат палива [4]. Тому розробка методів підвищення точності обсервації є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення точності визначення координат судна присвячено значну кількість наукових праць. У роботі [5] розглянуто методи оцінки підвищення надійності судноводіння та застосування ортогонального розкладання щільності розподілу погрішностей навігаційних вимірювань. Дослідження [6] присвячене методам обробки вимірювань та статистичній інтерпретації їх ефективності. У роботі [7] розглянуто особливості ідентифікації законів розподілу навігаційних погрішностей змішаними законами двох типів. Проте питання комплексного підвищення енергоефективності шляхом мінімізації дисперсії погрішності обсервації потребує додаткового дослідження [8 – 10].

Мета дослідження. Розробка методу підвищення енергоефективності судна шляхом мінімізації дисперсії погрішності обсервації з використанням ортогонального розкладання щільності розподілу погрішностей навігаційних вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Як показано в роботі [5], система рівнянь правдоподібності має вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln [f_i(\xi_i)] = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln [f_i(\xi_i)] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i,$$

де n – число ліній положення;

α_i і r_i – напрямки градієнта і перенос i -ї лінії положення;

f_i – щільність розподілу погрішностей навігаційних вимірювань.

Враховуючи, що в загальному випадку справедливе співвідношення:

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln [f_i(\xi_i)] = \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i)}{f_i(\xi_i)},$$

тому, з урахуванням наведеної рівності, система рівнянь правдоподібності (1) приймає наступний вигляд:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i)}{f_i(\xi_i)} = 0, \\ \sum_{i=1}^n \cos \alpha_i \frac{\frac{\partial}{\partial \xi_i} f_i(\xi_i)}{f_i(\xi_i)} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\xi_i = X \sin \alpha_i + Y \cos \alpha_i - r_i,$$

В роботі [1] запропоновано в якості щільності розподілу погрішностей навігаційних вимірювань використовувати її ортогональне розкладання, причому показано, що найкращу узгодженість з гістограмами погрішностей вимірювання має ортогональне розкладання лише з першим членом, який має наступний аналітичний вираз:

$$f_i(\xi_i) = (2\pi)^{-1/2} \sigma_i^{-1} \exp\left(\frac{-\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \left\{ 1 + \frac{\left(\frac{\mu_{4i}}{\sigma_i^4} - 3\right)}{24!} \left[\left(\frac{\xi_i}{\sigma_i^2}\right)^4 - 6 \left(\frac{\xi_i}{\sigma_i^2}\right)^2 + 3 \right] \right\},$$

де $\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3$ (ексцес розподілу);

μ_{4i} – четвертий центральний момент погрішності;

σ_i^2 – дисперсія погрішності.

Знайдемо вираз першої похідної $\frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln f_i(\xi_i)$ для наведеного ортогонального розкладання:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln f_i(\xi_i) &= \frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln \left\{ (2\pi)^{-1/2} \sigma_i^{-1} \exp\left(\frac{-\xi_i^2}{2\sigma_i^2}\right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[1 + \frac{\left(\frac{\mu_{4i}}{\sigma_i^4} - 3\right)}{24!} \left[\left(\frac{\xi_i}{\sigma_i^2}\right)^4 - 6 \left(\frac{\xi_i}{\sigma_i^2}\right)^2 + 3 \right] \right] \right\}, \end{aligned}$$

або

$$\frac{\partial}{\partial \xi_i} \ln f_i(\xi_i) = -\xi_i / \sigma_i^2 + \left\{ \frac{(\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3)}{4!} [4\xi_i^3 / \sigma_i^8 - 12\xi_i / \sigma_i^4] \right\} / Q,$$

де

$$Q = \left[1 + \frac{(\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3)}{4!} \left[\left(\xi_i / \sigma_i^2\right)^4 - 6 \left(\xi_i / \sigma_i^2\right)^2 + 3 \right] \right].$$

Підставляючи даний вираз в вихідну систему рівнянь, отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1} \sin \alpha_i \left\{ -\frac{\xi_i}{\sigma_i^2} + \frac{\frac{(\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3)}{(4)!} [4\xi_i^3/\sigma_i^8 - 12\xi_i/\sigma_i^4]}{\left[1 + \frac{(\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3)}{(4)!} [(\xi_i/\sigma_i^2)^4 - 6(\xi_i/\sigma_i^2)^2 + 3] \right]} \right\} = 0; \\ \sum_{i=1} \cos \alpha_i \left\{ -\frac{\xi_i}{\sigma_i^2} + \frac{\frac{(\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3)}{(4)!} [4\xi_i^3/\sigma_i^8 - 12\xi_i/\sigma_i^4]}{\left[1 + \frac{(\mu_{4i}/\sigma_i^4 - 3)}{(4)!} [(\xi_i/\sigma_i^2)^4 - 6(\xi_i/\sigma_i^2)^2 + 3] \right]} \right\} = 0; \\ \xi_i = x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i. \end{array} \right.$$

У випадку рівноточних ліній положення $\sigma_i^2 = \sigma^2$ і $\mu_{4i} = \mu_4$ попередня система рівнянь приймає наступний вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1} \sin \alpha_i \left\{ -\frac{\xi_i}{\sigma^2} + \frac{\frac{(\mu_4/\sigma^4 - 3)}{(4)!} [4\xi_i^3/\sigma^8 - 12\xi_i/\sigma^4]}{\left[1 + \frac{(\mu_4/\sigma^4 - 3)}{(4)!} [(\xi_i/\sigma^2)^4 - 6(\xi_i/\sigma^2)^2 + 3] \right]} \right\} = 0; \\ \sum_{i=1} \cos \alpha_i \left\{ -\frac{\xi_i}{\sigma^2} + \frac{\frac{(\mu_4/\sigma^4 - 3)}{(4)!} [4\xi_i^3/\sigma^8 - 12\xi_i/\sigma^4]}{\left[1 + \frac{(\mu_4/\sigma^4 - 3)}{(4)!} [(\xi_i/\sigma^2)^4 - 6(\xi_i/\sigma^2)^2 + 3] \right]} \right\} = 0; \\ \xi_i = x \sin \alpha_i + y \cos \alpha_i - r_i. \end{array} \right. \quad (3)$$

Розв'язуючи дану систему рівнянь та маючи значення дисперсії σ^2 і четвертого центрального моменту μ_4 вихідного розподілу погрішностей, знаходимо обсервовані координати судна, не використовуючи вираз для щільності розподілу ймовірностей похибок ліній положення.

Ефективність обсервованих координат судна в контексті розглянутої проблеми має статистичну інтерпретацію, тобто згідно [6] дорівнює відношенню норми мінімально можливої коваріаційної матриці $K_{\min}(x, y)$ обсервованих координат до норми їх коваріаційної матриці $K_{\text{pos}}(x, y)$, яка забезпечується застосуванням методом розрахунку координат.

Ефективність е оцінки обсервованих координат судна визначається виразом [6]:

$$e = \frac{q^2}{ps},$$

де p , s і q – невластні інтеграли, що залежать від щільностей дійсного та передбачуваного розподілу.

Припустимо, що дійсний розподіл похибок виміру навігаційного параметра описується щільністю $f(x)$, а щільністю передбачуваного закону розподілу, за яким здійснюється розрахунок обсервованих координат, є $\varphi(x)$.

Для отримання оцінки ефективності необхідно знайти невластні інтеграли q , p і s , використовуючи вирази [6]:

$$q = \int_{R1} f(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) \right] \varphi(x) - \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) \right]^2}{\varphi^2(x)} \right\} dx; p = \int_{R1} f(x) \left\{ \left[\frac{\frac{\partial}{\partial x} \varphi(x)}{\varphi(x)} \right]^2 \right\} dx; s = \int_{R1} \frac{\left[\frac{\partial}{\partial x} f(x) \right]^2}{f(x)} dx.$$

Звертаємо увагу на те, що невластний інтеграл q представляє різницю двох інтегралів:

$$\begin{aligned} q &= \int_{R1} f(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) \right] \varphi(x) - \left[\frac{\partial}{\partial x} \varphi(x) \right]^2}{\varphi^2(x)} \right\} dx = \\ &= \int_{R1} f(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) \right] \varphi(x)}{\varphi^2(x)} \right\} dx - \int_{R1} f(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial}{\partial x} \varphi(x) \right]^2}{\varphi^2(x)} \right\} dx, \end{aligned}$$

причому другий інтеграл в отриманому виразі дорівнює інтегралу p .

Тому можна записати:

$$q = \int_{R1} f(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \varphi(x) \right]}{\varphi(x)} \right\} dx - p.$$

Припустимо, є n ліній положення, похибки яких розподілені за законом, що відрізняється від закону Гауса, наприклад, за змішаним законом першого типу [7], із щільністю $f_1(x)$. Оцінимо ефективність координат судна за її розрахунку методом (6.4) із застосуванням ортогонального розкладання щільності.

З метою позбавлення від масштабних параметрів у щільності $f_1(x)$ та її розкладанні $\varphi(x)$ необхідно для їхньої сумісності, розглянемо їх відповідні нормовані щільності $g_1(x)$ $g_1(x)$ і $\psi(x)$, де x – нормована та центрована випадкова похибка виміру. Причому:

$$g_1(x) = \frac{B_1}{(x^2 / ((2n-1)+1))^{n+1}}. \quad (4)$$

Тут $B_1 = \frac{2^{2n} [(n)!]^2}{(2n-1)^{1/2} \pi (2n)!}$ – нормуючий множник, n – суттєвий цілий параметр. Дисперсія x дорівнює 1, а четвертий центральний момент

$$\mu_4 = \frac{(2n-1)^2 n! [2(n-2)]!}{2(2n)! (n-2)!}.$$

Ортогональний розкладання щільності $\psi(x)$ нормованої випадкової величини з одиничною дисперсією має такий вигляд:

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right) \left[1 + \frac{(\mu_4-3)}{24}(x^4 - 6x^2 + 3)\right].$$

Для зручності позначимо $f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right)$, тому:

$$\psi(x) = f_N(x) \left[1 + \frac{(\mu_4-3)}{24}(x^4 - 6x^2 + 3)\right]. \quad (5)$$

Ефективність e_R координат судна в даному випадку визначається виразом:

$$e_R = \frac{q^2}{ps}, \quad (6)$$

де p , q і s – невластні інтеграли, які залежать від щільностей $g_1(x)$ і $\psi(x)$.

Напишемо вирази невластних інтегралів p , q і s залежно від щільностей $g_1(x)$ і $\psi(x)$:

$$q = \int_{R1} g_1(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} \right]}{\psi(x)} \right\} dx - p; \quad p = \int_{R1} g_1(x) \left\{ \left[\frac{\frac{\partial \psi(x)}{\partial x}}{\psi(x)} \right]^2 \right\} dx; \quad s = \int_{R1} \frac{\left[\frac{\partial g_1(x)}{\partial x} \right]^2}{g_1(x)} dx.$$

Розрахунок значення інтеграла p вимагає виразу для похідної $\frac{\partial}{\partial x} \psi(x)$:

$$\frac{\partial}{\partial x} \psi(x) = f_N(x) \left\{ -x + \frac{(\mu_4-3)}{24} [-x^5 - 10x^2 - 15x] \right\}.$$

Тому невластний інтеграл p обчислюється за допомогою виразу:

$$p = \int_{R1} \frac{B_1}{\left(\frac{x^2}{(2n-1)+1} \right)^{n+1}} \left\{ \frac{-x + \frac{(\mu_4-3)}{24} [-x^5 - 10x^2 - 15x]}{1 + \frac{(\mu_4-3)}{24} (x^4 - 6x^2 + 3)} \right\}^2 dx. \quad (7)$$

Для розрахунку значення інтеграла q слід знайти вираз для другої похідної $\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x)$:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) = f_N(x) \left[Q(x) + \frac{(\mu_4-3)}{6} (-2x^4 + 9x^2 - 3) \right],$$

де

$$Q(x) = (x^2 - 1) \left[1 + \frac{(\mu_4-3)}{24} (x^4 - 6x^2 + 3) \right].$$

Тому:

$$q = \int_{R1} \frac{B_1}{\left(x^2 / ((2n-1)+1) \right)^{n+1}} \left\{ \frac{Q(x) + \frac{(\mu_4-3)}{6} (-2x^4 + 9x^2 - 3)}{1 + \frac{(\mu_4-3)}{24} (x^4 - 6x^2 + 3)} \right\} dx - p.. \quad (8)$$

Знайдемо вираз для невластного інтеграла s , для чого скористаємося виразом стандартної щільності ненормованої похибки, що має вигляд:

$$f_1(\xi) = \frac{A_m}{\left(\xi^2/2 + \lambda\right)^{m+1}},$$

де

$$A_m = \frac{2^{2m} (m!)^2}{\sqrt{2\pi} (2m)!} \lambda^{m+1/2}. \quad (9)$$

У роботі [5] показано, що для даної щільності невластний інтеграл s набуває такого вигляду:

$$s = \frac{(n+1)(2n+1)}{(2n-1)(n+2)}. \quad (10)$$

Проводилася оцінка ефективності e_R для щільності $g_1(x)$ із значеннями суттєвого параметра рівного 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10. У табл. 1 наведено значення нормуючого множника B_1 та четвертого центрального моменту μ_4 для зазначених значень параметра n . Розрахунок невластних інтегралів p і q проводився за виразами (7) і (8) методом Сімпсона з межами інтегрування від -6 до 6 , до якого потрапляють всі нормовані і центровані випадкові величини. Інтеграл s розраховувався за формулою (10). Оцінка ефективності e_R проводилася за допомогою виразу (6) та її значення наведено у другому рядку табл. 2.

Таблиця 1 – Значення нормуючого множника B_1 та моменту μ_4

n	2	3	4	5	6	8	10
B_1	0,4903	0,4558	0,4402	0,4314	0,4257	0,4187	0,4147
μ_4	9	5	4.2	3,857	3.667	3.462	3.353

У роботі [5] наведено результати розрахунку ефективності e_G координат судна у разі розподілу похибок ліній положення за змішаним законом першого типу із щільністю $g_1(x)$, а розрахунок координат виконувався методом найменших квадратів. Значення ефективності e_G наведені також у табл. 2.

Таблиця 2 – Ефективності e_G і e_R щільності розподілу $g_1(x)$

n	3	4	5	6	8	10
e_G	0,893	0,934	0,955	0,968	0,980	0,987
e_R	0,994	1	1	1	1	1

Аналіз табл. 2 показує високу ефективність e_R координат судна, отриманих пропонуваним методом застосування ортогонального розкладання, що перевищує ефективність e_G координат, розрахованих шляхом найменших квадратів.

Розглянемо ситуацію, коли похибки ліній положення розподілені за змішаним законом другого типу [7] із щільністю $f_2(\xi)$. Знайдемо вираз з метою оцінки ефективності координат судна за її розрахунку з допомогою рівнянь (3) із застосуванням ортогонального розкладання щільності.

Як і в попередньому випадку скористаємося нормованими щільностями $g_2(x)$ і $\psi(x)$ де x – нормована та центрована випадкова похибка виміру. Причому:

$$g_2(x) = \frac{B_2}{(x^2/2n+1)^{n+3/2}}.$$

У цьому виразі $B_2 = \frac{(2n+1)!}{(2n)^{1/2} 2^{2n+1} (n!)^2}$ – нормуючий множник, а центральний четвертий момент $\mu_4 = \frac{n^2 24(n-2)!}{8n!}$.

Вирази невластних інтегралів p , q та s залежно від щільностей $g_2(x)$ і $\psi(x)$ мають вигляд:

$$q = \int_{R1} g_2(x) \left\{ \frac{\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) \right]}{\psi(x)} \right\} dx - p; \quad p = \int_{R1} g_2(x) \left\{ \left[\frac{\frac{\partial}{\partial x} \psi(x)}{\psi(x)} \right]^2 \right\} dx; \quad s = \int_{R1} \frac{\left[\frac{\partial}{\partial x} g_2(x) \right]^2}{g_2(x)} dx.$$

З урахуванням раніше отриманих виразів для похідних $\frac{\partial}{\partial x} \psi(x)$ і $\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x)$ невластні інтеграли p і q обчислюються за допомогою виразів:

$$p = \int_{R1} \frac{B_2}{x^2/(2n+1)^{n+3/2}} \left\{ \frac{-x + \frac{(\mu_4-3)}{24} [-x^5 - 10x^2 - 15x]}{1 + \frac{(\mu_4-3)}{24} (x^4 - 6x^2 + 3)} \right\}^2 dx. \quad (11)$$

$$q = \int_{R1} \frac{B_2}{x^2/(2n+1)^{n+3/2}} \left\{ \frac{Q(x) + \frac{(\mu_4-3)}{6} (-2x^4 + 9x^2 - 3)}{1 + \frac{(\mu_4-3)}{24} (x^4 - 6x^2 + 3)} \right\}^2 dx - p. \quad (12)$$

Аналогічно попередньому випадку у роботі [5] отримано рішення невластного інтеграла s , яке має такий вигляд:

$$s = \frac{(2n+3)(n+1)}{2n(n+5)}. \quad (5)$$

Для щільності $g_2(x)$ проводився розрахунок ефективності e_R , причому значення суттєвого параметра дорівнює 2, 4, 6, 8, 10. У табл. 3 наведено значення нормуючого множника B_2 та четвертого центрального моменту μ_4 для перерахованих значень параметра n .

Таблиця 3 – Значення нормуючого множника B_2 та моменту μ_4

n	2	4	6	8	10
B_2	0,4688	0,4350	0,4233	0,4173	0,4137
μ_4	6	4	3.6	3.43	3.33

За виразами (11) і (12) проводився розрахунок невластних інтегралів p і q методом Сімпсона в межах інтегрування від -6 до 6 . Інтеграл s розраховувався за формулою (13). За допомогою виразу (6) проводився розрахунок оцінки ефективності e_R , а її отримані значення наведено у другому рядку табл. 4.

Результати розрахунку ефективності e_G координат судна у разі розподілу похибок ліній положення за змішаним законом другого типу із щільністю $g_2(x)$, а розрахунок координат виконувався методом найменших квадратів наведених у роботі [5]. Значення ефективності e_G наведені також у табл. 4.

Таблиця 4 – Ефективності e_G і e_R щільності розподілу $g_2(x)$

n	3	4	5	6	8	10
e_G	0,917	0,945	0,962	0,971	0,982	0,988
e_R	0,996	1	1	1	1	1

Аналізуючи табл. 4, відзначаємо високу ефективність e_R координат судна, розрахованих запропонованим методом застосування ортогонального розкладання, що перевищує ефективність e_G координат, одержаних методом найменших квадратів.

Таким чином, застосовуючи ортогональне розкладання щільності похибок ліній положення та розраховуючи координати місця судна за допомогою системи рівнянь (3), зменшується дисперсія похибки обсервації, що веде до підвищення енергоефективності.

Висновки. Запропонований метод визначення координат судна з використанням ортогонального розкладання щільності розподілу погрішностей забезпечує вищу ефективність порівняно з методом найменших квадратів. При цьому для обох типів змішаних законів розподілу погрішностей досягається практично повна ефективність (близька до 1) вже при $n \geq 4$. Зменшення дисперсії погрішності обсервації дозволяє підвищити точність визначення місця судна та, як наслідок, покращити його енергоефективність.

Y. Kalinichenko

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY BY MINIMIZING THE DISPERSION OF OBSERVATION ERRORS

The article discusses a method for increasing the energy efficiency of a vessel by minimizing the variance of the observation error with the introduction of an orthogonal decomposition of the distribution density of errors in navigation measurements. In modern conditions of operation of maritime transport, the problem of increasing the energy efficiency of vessels is of particular relevance. One of the most important factors affecting energy efficiency is the accuracy of determining the location of a vessel. Observation inaccuracies lead to deviations from the optimal route and, as a consequence, to an increase in fuel consumption. Therefore, the development of methods for increasing the accuracy of observation is an urgent scientific and practical task. It is proposed to use a system of likelihood equations taking into account the orthogonal decomposition of the density to increase the accuracy of determining the coordinates of a vessel. A comparative analysis of the effectiveness of the proposed method with the least squares method is carried out for cases of error distribution according to a mixed law of the first and

second types. The research results show that the proposed method provides a higher efficiency of determining the coordinates of a vessel compared to the least squares method. The results obtained can significantly increase the accuracy of the vessel's location and, as a consequence, improve its energy efficiency by reducing deviations from the optimal route. The proposed method for determining the ship's coordinates using the orthogonal decomposition of the error distribution density provides higher efficiency compared to the least squares method. At the same time, for both types of mixed error distribution laws, almost complete efficiency (about 1) is achieved already at $n \geq 4$. Reducing the variance of the observation error allows increasing the accuracy of determining the ship's location and, as a result, improving its energy efficiency.

Keywords: energy efficiency, observation, orthogonal decomposition, measurement error, navigation parameters, position lines.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO. (2020). EEDI: Energy Efficiency Design Index for Ships. International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/EEDI.aspx>
2. Von Knorring H. J. & Andersson, K. (2011). The Energy Efficiency Gap in Shipping: Barriers to Improvement, Conference: International Association of Maritime Economists (IAME) Conference. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/235874758_The_Energy_Efficiency_Gap_in_Shipping_-_Barriers_to_Improvement
3. Rudzky K., Gomulka P., Hoang A.T. (2022). Optimization Model to Manage Ship Fuel Consumption and Navigation Time, 29(3):141-153, DOI: 10.2478/pomr-2022-0034. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/364936493_Optimization_model_to_manage_ship_fuel_consumption_and_navigation_time
4. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2022). Review of Maritime Transport. Retrieved from https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf
5. Ворохобін І.І. Розробка теорії та методів оцінки підвищення надійності судноводіння: монографія. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 252 с.
6. Мудров В.М., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. М.: Советское радио, 1976. 192 с.
7. Астайкін Д.В., Алексейчук Б.М. Ідентифікація законів розподілу навігаційних погрішностей змішаними законами двох типів. Автоматизація судових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2014. Вип. 20. Одеса: ОНМА. С. 3-9.
8. International Hydrographic Organization (IHO). (2023). Standards for Hydrographic Surveys (S-44). Retrieved from <https://iho.int/en/standards-and-specifications>
9. Yang Z., Qu W., Zhuo J. (2024). Optimization of Energy Consumption in Ship Propulsion Control under Severe Sea Conditions, J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12(9), 1461, DOI: 10.3390/jmse12091461. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/9/1461>
10. Wärtsilä. (2024). Report: Sustainable fuels for shipping by 2050 – the 3 key elements of success. Wärtsilä Insights. Retrieved from <https://www.wartsila.com/insights>

REFERENCES

1. IMO. (2020). EEDI: Energy Efficiency Design Index for Ships. International Maritime Organization. Retrieved from <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/EEDI.aspx>
2. Von Knorring H. J. & Andersson, K. (2011). The Energy Efficiency Gap in Shipping: Barriers to Improvement, Conference: International Association of Maritime Economists (IAME) Conference. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/235874758_The_Energy_Efficiency_Gap_in_Shipping_-_Barriers_to_Improvement

3. Rudzky K., Gomulka P., Hoang A.T. (2022). Optimization Model to Manage Ship Fuel Consumption and Navigation Time, 29(3):141-153, DOI: 10.2478/pomr-2022-0034. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/364936493_Optimization_model_to_manage_ship_fuel_consumption_and_navigation_time
4. United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD). (2022). Review of Maritime Transport. Retrieved from https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf
5. Vorokhobin, I.I. (2019). Rozrobka teorii ta metodiv otsinky pidvyshchennia nadiinosti sudnovodinnia: monohrafiia [Development of theory and methods for assessing the improvement of navigation reliability: monograph]. Odesa: NU «OMA». [in Ukrainian]
6. Mudrov, V.M., & Kushko, V.L. (1976). Metody obrabotki izmerenii [Methods of measurement processing]. Moscow: Sovetskoe radio. [in Russian]
7. Astaikin, D.V., & Alekseichuk, B.M. (2014). Identyfikatsiia zakoniv rozpodilu navihatsiinykh pohrishnostei zmishanymy zakonamy dvokh typiv [Identification of navigation error distribution laws by mixed laws of two types]. Avtomatyzatsiia sudovykh tekhnichnykh zasobiv: nauk.-tekhn. zb. Odesa: ONMA, 20, 3-9. [in Ukrainian]
8. International Hydrographic Organization (IHO). (2023). Standards for Hydrographic Surveys (S-44). Retrieved from <https://iho.int/en/standards-and-specifications>
9. Yang Z., Qu W., Zhuo J. (2024). Optimization of Energy Consumption in Ship Propulsion Control under Severe Sea Conditions, J. Mar. Sci. Eng. 2024, 12(9), 1461;, DOI: 10.3390/jmse12091461. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/9/1461>
10. Wärtsilä. (2024). Report: Sustainable fuels for shipping by 2050 – the 3 key elements of success. Wärtsilä Insights. Retrieved from <https://www.wartsila.com/insights>