

ВПЛИВ ТОЧНОСТІ СУДНОВОДІННЯ НА ЕКОНОМІЧНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Олександр Вікторович Гайченя

Кафедра "Морські перевезення",
Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна
ORCID 0000-0002-7899-4418

Михайло Степанович Алексейчук

Кафедра "Електронні комплекси судноводіння",
Національний Університет "Одеська морська академія", Одеса, Україна

Анотація: у роботі розглянуто модель процесу керованого переміщення судна прямолінійною траєкторією руху в умовах зовнішніх збурень. Показано, що оцінкою точності керованого переміщення судна з урахуванням зовнішніх збурень являється дисперсія модуля траєкторної похибки. Також показані можливі шляхи покращення точності судноводіння та зниження витрат палива на перевезення вантажу.

Ключові слова: точність судноводіння, кероване переміщення судна, зовнішні збурення, траєкторна похибка, витрати палива.

1. Вступ

При суднових перевезеннях проводиться завантаження у порту відправлення та доставка вантажу в порт призначення. Затрати на перевезення також включають вартість палива на перехід судна з порту завантаження до порту призначення.

Планування програмного маршруту руху судна між портами проводиться завчасно, і вибирається найбільш економічний безпечний маршрут, що потребує мінімальної витрати палива на перехід. Ефективність його реалізації характеризується мінімальним відхиленням реальної траєкторії від програмної. Кількість палива W_t необхідну для переходу в першому наближенні можливо оцінити аналітичним виразом:

$$W_t = DLq,$$

де D - водотоннажність судна;

L - протяжність маршруту;

q - витрата палива на перевезення однієї тони на одну мілю при середній заданій швидкості судна.

В реальних умовах плавання на судно діють зовнішні збурення, які відхиляють його від програмної траєкторії руху. Тому в судноводінні застосовується спосіб коригуючого водіння по обсерваціях, який компенсує вплив зовнішніх збурень і забезпечує рух судна по запланованому маршруту, але через це протяжність реальної траєкторії більша від програмної. Якщо позначити через L_0 протяжність програмної траєкторії, а через ΔL - різницю між протяжностями реальної і програмної траєкторій, то має місце співвідношення $L = L_0 + \Delta L$. Очевидно, через різницю ΔL виникають додаткові втрати палива, а економічна ефективність полягає в мінімізації величини ΔL . В дослідженні покажемо, що в даному разі величина ΔL пов'язана з точністю судноводіння, тому має сенс розглянути роботи, що досліджують різні аспекти точності судноводіння.

2. Мета та задачі дослідження

Об'єкт дослідження - кероване переміщення судна по прямолінійній траєкторії в умовах зовнішніх збурень.

Предмет дослідження - економічна ефективність від підвищення точності судноводіння.

Мета дослідження - формалізація керованого переміщення судна для пошуку можливостей підвищення точності судноводіння і зниження витрат палива на реалізацію програмного маршруту руху судна.

Задачі дослідження:

1. формалізувати процес керованого переміщення судна в умовах зовнішніх збурень при реалізації прямолінійної траєкторії руху;
2. провести оцінку точності керованого переміщення судна, на яке діють зовнішні збурення;
3. визначити можливі шляхи покращення точності судноводіння та зниження витрат палива на перевезення вантажу.

3. Аналіз джерел

Проблемі забезпечення точності судноводіння присвячено багато робіт по тематиці безпеки мореплавання.

В роботі [1] розглянуто ефективність обсервованих координат судна в разі їх квазіправдоподібних оцінок, що актуально для випадку розрахунку координат методом максимальної правдоподібності для передбачуваного змішаного закону першого типу у разі, коли випадкові похибки навігаційних вимірювань розподілені за нормальним законом.

Ортогональне розкладання щільності розподілу похибок навігаційних вимірів для вирішення задачі визначення місця судна в разі наявності надмірних вимірів запропоновано у статті [2], а в роботі [3] результатами аналізу даних по точності визначення місця судна супутниковою навігаційною системою спростовуються гіпотези про розподіл похибок вимірювання широти та довготи за нормальним законом та наголошується актуальність використання альтернативних законів розподілу.

Аналіз статистичних даних похибок навігаційних вимірювань, одержаних в натурних спостереженнях, приведений у роботі [4] показав, що розподіл похибки часто не підкоряється нормальному закону. В ній показано відмінності розподілу похибок від закону Гусу.

У роботі [5] приведено результати аналізу сигналу Galileo E1 та його залежність від різних типів збурень, для чого проводилося моделювання хаотичних імпульсних збурень, білого шуму та інших типів збурень. Були визначені спектральні структури цих збурень, які за допомогою Matlab були включені в сигнал E1. В роботі показано, що за допомогою фільтру Калмана проводилась фільтрація білого шуму з сигналу E1. Наголошується, що результати роботи можуть бути використані при розробці приймачів підвищеної надійності, здатних ігнорувати такі типи збурень.

Можливість використання узагальненого закону розподілу Пуассона при залежних випадкових величин вимірювань показана у роботах [6,7], а у роботі [8] досліджено точність координат судна, які розраховані методом найменших квадратів, при надмірних вимірюваннях та формалізовано вплив істотних факторів на точність координат позиції судна.

В роботі [9] показано, що при використанні РЛС похибки вимірювань відстаней та пеленгів мають розподіл за змішаними законами першого та другого типу, але відсутній аналіз, як це впливає на точність визначення місця судна, а робота [10] присвячена змішаним законам розподілу двох типів та їх використанню для випадкових навігаційних похибок вимірювань.

В роботі [11] приведено результати дослідження доцільності урахування розрахованих поправок станції в районі порту Щецін при використанні системи DGPS, згідно яким рекомендується їх урахування при визначенні місця судна. Показано, що запропоновані

рекомендації забезпечують більш ефективне використання системи DGPS при плаванні суден в районі порту Шецін.

Робота [12] присвячена аналізу розробленої оцінки відповідності точності визначення координат глобальною супутниковою навігаційною системою (GNSS) існуючим вимогам, в якій також презентовано модель накопичення необхідного об'єму спостережень похибок положення об'єкту, викликаних різними типами зовнішніх збурень, та впливають на точність визначення позиції. Розглянуто запропоновану модель для полярного регіону з використанням вимірних псевдовідстаней на опорній станції мережі Міжнародної служби GNSS Iqaluit в Канаді.

Як показано в роботі [13], для входу судна в гавань, яка знаходиться на відкритому морському побережжі, в умовах шторму виникає небезпека зіткнення з хвилеломом через небезпечні зміщення судна відносно програмної траєкторії руху. В роботі розглянуто індекси оцінки безпеки входу в гавань, що базуються на натурних дослідженнях траєкторій руху судна.

Опис випадкової фази сигналу E6 супутникової навігаційної системи Galileo та математичні моделі її вимірювальних сигналів з використанням наявної інформації приведено в роботі [14]. В статті також розроблено фазову модель E6 сигналу системи Galileo. В результаті проведеного моделювання було виявлено, що сигнал E6 має нестабільну частоту і являється стаціонарним процесом, що має значний вплив на випадкову фазу сигналу E6 і на точність навігаційних вимірювань.

Визначенню ефективних координат судна по пеленгам та дистанціям декількох орієнтирів присвячена робота [15], в якій розглянуто розробку способу визначення обсервованих координат по вимірних пеленгам та дистанціям орієнтирів в разі розподілу похибок вимірювання по нормальному закону, що актуально для сучасних ЕКНІС передбачена можливість визначення місця судна за пеленгами та дистанціями до орієнтирів на електронній карті. Причому необхідну точність обсервації можна забезпечити надмірними вимірами навігаційних параметрів, а розрахунок обсервованих координат провадиться методом найменших квадратів.

В роботі [16] розглянуто геометричний фактор, що визначається кількістю та взаємним розташуванням ЛП, та показано, що він також визначає значення дисперсії обсервації. В ній одержано формульні вирази дисперсії обсервації в разі розподілу похибок вимірювання навігаційних параметрів за нормальним законом та за змішаними законами першого і другого типів.

4. Дослідження

В даному розділі розглянемо різницю ΔL між протяжностями реальної і програмної траєкторій при коригуючому водінні судна по обсерваціях, яка виникає під впливом зовнішніх збурень, та можливість її мінімізації.

Розглянемо вираз для дисперсії траєкторної похибки, враховуючи те, що в умовах зовнішніх збурень застосовується спосіб коригування руху за обсерваціями, який ще називають способом постійного навігаційного режиму, тобто у дискретні моменти часу t , при чому t приймає цілочисленні значення $(0, 1 \dots)$ визначаються обсервовані координати судна. Інтервал між спостереженнями Δt можна вважати постійним і протягом цього інтервалу судно слідує з незмінними параметрами руху K і V .

В кожен момент часу t справжнє положення судна характеризується вектором $x(t)$ у системі координат $O\Delta\varphi_t \Delta w_t$, початок якої знаходиться в програмній позиції, що відповідає моменту часу t , а вісі паралельні вісям географічної системи координат (рис 1).

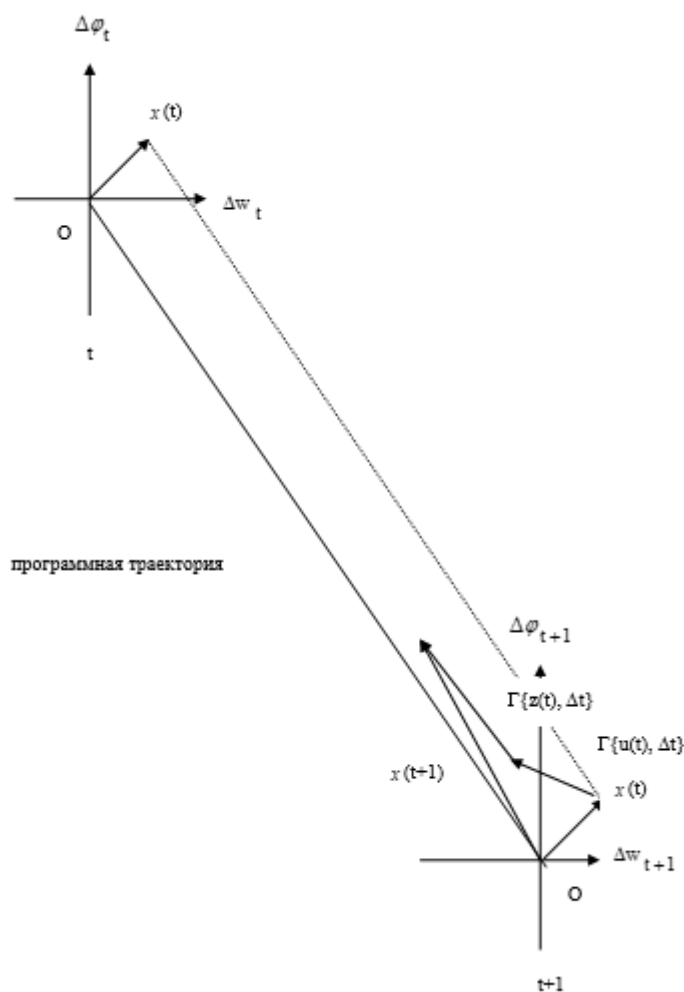


Рис. 1. До складання різницевого стохастичного рівняння руху
Власна розробка автора

В результаті спостереження отримують оцінку $\hat{x}(t)$ вектора $x(t)$. Отримана величина оцінки вектора $\hat{x}(t)$ є оцінкою зносу судна, який накопичився на момент часу t . Вказаний знос компенсується до моменту часу $t+1$, тобто за інтервал часу Δt , за допомогою вектора керуючих дій судна $u(t)$. Причому вибір вектора $u(t)$ здійснюється таким чином, щоб попередити появу зносу судна до моменту часу $t+1$.

Тому вектор $x(t+1)$ у момент часу $t+1$ (істинного розташування судна), тепер уже заданий системі координат $O \Delta\varphi_{t+1} \Delta w_{t+1}$, початок якої належить програмній траєкторії та знаходиться в точці відповідного моменту часу $t+1$, визначається лінійним різницевим стохастичним рівнянням (рис. 1):

$$x(t+1) = x(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + \Gamma\{z(t), \Delta t\}, \quad (1)$$

де $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$ - зміщення судна щодо програмної траєкторії за інтервал часу Δt в результаті прикладених керуючих дій $u(t)$;

$\Gamma\{z(t), \Delta t\}$ - переносне переміщення судна відносно програмної траєкторії під впливом зовнішнього збурення $z(t)$ за інтервал часу Δt .

Очевидно, величина вектора $x(t+1)$ значною мірою визначається значенням $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$, що є керованим, оскільки залежить від вектора керуючих дій $u(t)$. Забезпечення мінімального значення вектора $x(t+1)$ відбувається у такий спосіб. Виходячи із значень величин V , Δt та

$\hat{x}(t)$, в момент часу t проводиться прогноз очікуваного значення вектора $x(t+1)$, причому прогнозоване значення позначимо $\bar{x}(t+1)$. Для прогнозу використовується вектор вимірів $y(t)$, за допомогою якого проводиться оцінка $\hat{x}(t)$. Очевидно, прогноз доцільно робити за наступною рекурентною формулою:

$$\bar{x}(t+1) = \bar{x}(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} + M_1[y(t)],$$

де $\bar{x}(t)$ - прогноз вектора $x(t)$ на момент часу t , зроблений під час попередньої обсервації в момент часу $t-1$;

$M_1[y(t)]$ - поправка до прогнозуючого стану $\bar{x}(t)$ з урахуванням вектора вимірів $y(t)$, причому поправка визначається за допомогою алгоритму M_1 , а як вихідні дані вибираються різниця між виміряними і прогнозованими значеннями вектора $x(t)$;

$\hat{z}(t)$ – оцінка величини діючого збурення.

Переміщення $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$ необхідно вибирати таким чином, щоб величина прогнозу $\bar{x}(t+1)$ оберталася в 0, тобто відповідно до залежності:

$$\Gamma\{u(t), \Delta t\} = -\bar{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} - M_1[y(t)].$$

Якщо врахувати, що на попередньому інтервалі часу вибір переміщення $\Gamma\{u(t-1), \Delta t\}$ проводився, виходячи з вимоги обернення в 0 прогнозу $\bar{x}(t)$, то отримаємо наступну залежність:

$$\Gamma\{u(t), \Delta t\} = -\bar{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} - M_1[y(t)].$$

З отриманого виразу випливає, що $M_1[y(t)]$ є вектором перенесення в системі координат $O\Delta\varphi_t \Delta w_t$ і, очевидно, оцінка $\hat{x}(t)$ є величиною $M_1[y(t)]$, тобто $\hat{x}(t) = M_1[y(t)]$, або:

$$\hat{x}(t) = x(t+1) + \chi_{M1}(t), \quad (2)$$

де $\chi_{M1}(t)$ - похибка обсервації, яка також залежить від алгоритму $M1$.

Отже, з урахуванням останньої залежності, переміщення $\Gamma\{u(t), \Delta t\}$ формалізується наступним виразом:

$$\Gamma\{u(t), \Delta t\} = -\hat{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\} \quad (3)$$

Очевидно, рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$x(t+1) = x(t) + \Gamma\{u(t), \Delta t\} + \Gamma\{z(t), \Delta t\} + G\{h(t), \Delta t\},$$

де $G\{h(t), \Delta t\}$ - зміщення судна, спричинене похибками приладів счислення, за інтервал часу Δt .

Підставляючи в останній вираз залежність (3), отримаємо:

$$x(t+1) = x(t) + \Gamma\{z(t), \Delta t\} + G\{h(t), \Delta t\} - \hat{x}(t) - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\}.$$

З урахуванням виразу (2) остання залежність набуває остаточного вигляду:

$$x(t+1) = \chi(t, \Delta t) + v(t, \Delta t) + \varepsilon(t, \Delta t),$$

де $\chi(t, \Delta t) = \chi_{M1}(t, \Delta t)$;

$v(t, \Delta t) = \Gamma\{z(t), \Delta t\} - \Gamma\{\hat{z}(t), \Delta t\}$ - похибка в урахуванні впливу зовнішнього збурення $z(t)$; $\varepsilon(t, \Delta t)$ - похибка, що виникає через похибки приладів числення, і $\varepsilon(t, \Delta t) = G\{h(t), \Delta t\}$.

Вищевикладене проілюструємо за допомогою рис. 2. У момент часу t справжнє місце судна визначалося б точкою M_0 (кінець вектора $x(t)$). На момент часу $t+1$, якби прогноз значення збурення збігся з його дійсним значенням, то судно виявилось б у точці M_2 , вважаючи, що похибки у показаннях приладів числення відсутні. При цьому вектор $x(t+1)$ дорівнював би тільки похибці обсервації $\chi(t)$.

Оскільки прогнозоване переміщення судна під впливом зовнішніх збурень відрізняється від дійсного на величину $v(t, \Delta t)$, то за відсутності похибок приладів числення судно перебувало б у точці M_3 , а вектор $x(t+1)$ визначився б сумою похибок $\chi(t)$ і $v(t, \Delta t)$.

Наявність похибки приладів числення $\varepsilon(t, \Delta t)$ визначає місце судна в точці M_4 , при цьому вектор $x(t+1)$ є сумою всіх трьох похибок $\chi(t)$, $v(t, \Delta t)$ і $\varepsilon(t, \Delta t)$. Тому вектор $x(t)$ є випадковою двовимірною величиною, яку називатимемо похибкою траєкторного управління, або просто траєкторною похибкою, а послідовність значень $x(t)$ у часі є випадковим процесом з дискретним часом, який описує рух судна щодо програмної траєкторії.

Причому $x(t)$ є випадковим процесом, утвореним сумою трьох двовимірних процесів $\chi(t)$, $v(t, \Delta t)$ та $\varepsilon(t, \Delta t)$. Так як основною характеристикою керованого руху судна є траєкторна похибка, то оцінкою якості керування судном можна вибрати коваріаційну матрицю траєкторної похибки, яку позначимо $R(t+1)$, а її вираз має наступний вигляд, з урахуванням того, що всі три складові процесу незалежні:

$$R(t+1) = E\{x(t+1) x(t+1)^T\} = K(t) + R_v(t, \Delta t) + R_e(t, \Delta t),$$

де $K(t)$, $R_v(t, \Delta t)$, $R_e(t, \Delta t)$ - коваріаційні матриці відповідно похибок обсервації $\chi(t)$, урахування впливу зовнішніх збурень $v(t, \Delta t)$ і приладів числення $\varepsilon(t, \Delta t)$.

Отже, можна вважати, що якість реалізації судном програмної траєкторії тим вища, чим менші елементи коваріаційної матриці $R(t)$ траєкторної похибки.

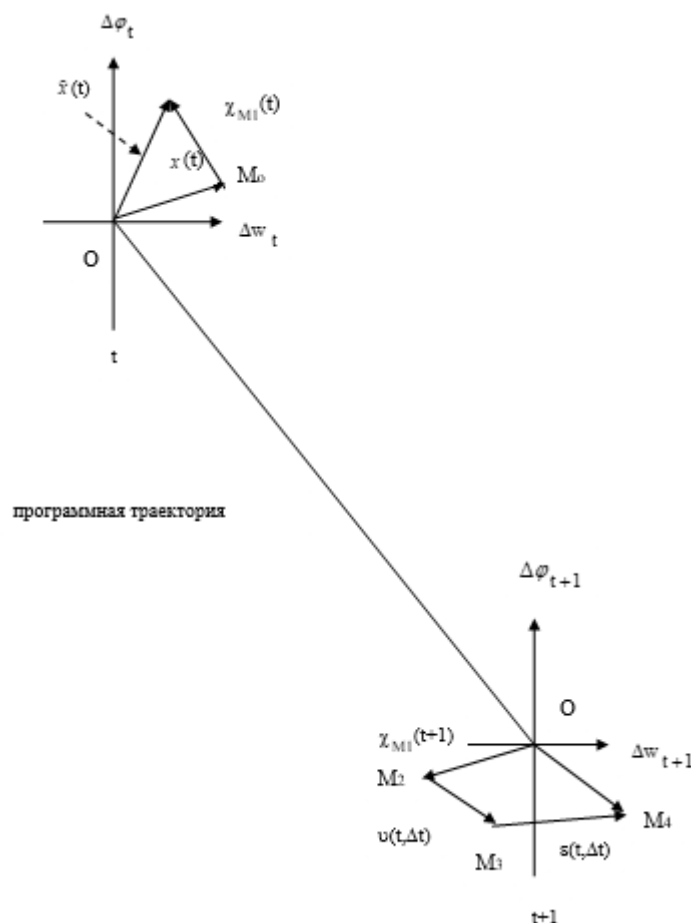


Рис. 2. Формування траєкторної похибки керування судном
Власна розробка автора

Відзначимо, що коваріаційна матриця $R(t)$ траєкторної похибки $\eta = x(t)$, як двовимірної величини, може бути позначена $R(x, y)$ і виражається через центральні і змішані моменти другого порядку наступним чином:

$$R(x, y) = \begin{bmatrix} D_x & D_{xy} \\ D_{yx} & D_y \end{bmatrix}.$$

Звертаємо увагу на те, що в коваріаційній матриці $R(x, y)$ значення діагональних елементів D_x та D_y є дисперсіями складових двовимірної векторіальної траєкторної похибки η по ортогональних осях. Отже, сума цих дисперсій є дисперсією модуля векторіальної траєкторної похибки D , тобто $D = D_x + D_y$. Позначимо через σ середнє квадратичне відхилення (с.к.в.) модуля векторіальної траєкторної похибки, причому $\sigma = \sqrt{D}$.

Очевидно, що за проміжок часу Δt між обсерваціями дійсна позиція судна відхилена від програмної позиції в середньому на величину с.к.в. σ . Якщо протяжність програмної траєкторії L_0 всього переходу поділити на відстань, яку судно проходить за час Δt між обсерваціями, то кількість обсервацій за весь перехід k визначається відношенням:

$$k = \frac{L_0}{V_m \Delta t},$$

де V_m - середня швидкість руху судна по програмній траєкторії.

В цьому разі різницю між довжинами реальної і програмної траєкторій ΔL можливо оцінити наступним чином:

$$\Delta L = k\sigma,$$

тобто величину ΔL , а отже і додаткові втрати палива $\Delta W_t = D\Delta Lq$, можливо знизити шляхом зменшення дисперсії модуля векторіальної траєкторної похибки D , зокрема дисперсії модуля векторіальної похибки обсервації D_n .

Як показано в роботі [36], дисперсія обсервації D_n при нормальному розподілі похибок ліній положення (ЛП) має вигляд:

$$D_n = gf(n, \alpha_i) D_m,$$

$$\text{де } gf(n, \alpha_i) = \frac{\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i + \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i}{\left[\left(\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right]} - \text{геометричним фактор, який}$$

залежить лише від взаємного розташування ЛП;

n - число ЛП;

α_i - кут напрямку градієнту і -ї ЛП;

D_m - дисперсія похибки ліній положення.

Таким чином, дисперсія обсервації D_n залежить від дисперсії D_m похибки ліній положення та геометричного фактору $gf(n, \alpha_i)$.

У даному дослідженні не будемо розглядати способи зниження дисперсії похибок урахування впливу зовнішніх збурень $v(t, \Delta t)$ і приладів счислення $\varepsilon(t, \Delta t)$.

5. Результати та обговорення

Аналізуючи результати дослідження, можливо зробити висновок, що скорочення витрати палива на перевезення вантажу визначається зменшенням дисперсії модуля векторіальної траєкторної похибки D , яке, в свою чергу, залежить від зниження дисперсії обсервації D_n . Зниження дисперсії D_n досягається зменшенням як дисперсії D_m похибки ліній положення, так і геометричного фактору $gf(n, \alpha_i)$. Тому для обсервації слід вибирати, по-перше, більш точні ЛП. По-друге, проведеними дослідженнями було встановлено, що при постійному куті $\Delta \alpha_i$ між сусідніми напрямками α_i і α_{i+1} , значення якого є $\Delta \alpha_i = \frac{360}{n}$, геометричний фактор $gf(n, \alpha_i)$ набуває мінімального значення, що залежить лише від числа n ЛП, як показано в табл. 1.

Таблиця 1. Залежність геометричного фактору від числа n ЛП

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k(n, \alpha_i)$	2	1,333	1	0,8	0,666	0,5714	0,5	0,444	0,4

[36]

Очевидно, збільшуючи число ЛП з їх оптимальним взаємним положенням, можливо суттєво зменшити дисперсію обсервації D_n .

Науковою новизною виконаної роботи являється наступне:

1. Модель керованого руху судна прямолінійною траєкторією, коли на судно впливають зовнішні збурення, яка розглядає переміщення судна, як випадковий процес з дискретним часом.

2. Оцінка точності судноводіння з допомогою коваріаційної матриці траєкторної похибки.

3. Залежність витрати палива на перевезення вантажу від дисперсії модуля траєкторної похибки.

В подальшому доцільно розглянути способи зниження дисперсії похибок урахування впливу зовнішніх збурень і приладів счислення.

6. Висновки

1. Формалізовано кероване переміщення судна по прямолінійній траєкторії руху при наявності зовнішніх збурень і показано, що воно являється випадковим процесом з дискретним часом.

2. Одержано вираз коваріаційної матриці траєкторної похибки, яка характеризує точність керованого переміщення судна в умовах зовнішніх збурень.

3. Визначено можливі шляхи покращання точності судноводіння та більш детально розглянуто можливості зниження дисперсії векторіальної похибки обсервації, що скорочує витрати палива на перевезення вантажу.

Список літератури:

1) Алексейчук, Б.М. (2025). Визначення ефективності обсервованих координат судна в разі їх квазіправдоподібних оцінок. Судноводіння | Shipping & Navigation, (37), 19-29. DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.19-29.

2) Vorokhobin, I.I., Aleksishin, V.G., Fusar, I. Yu. (2018). Universalnyi sposob stohasticheskogo opisaniya sluchainykh pogreshnostei navigatsionnykh izmereniy [A universal method for the stochastic description of random errors in navigation measurements]. *Sudovozhdenie [Navigation]*, (28), 42–47.

3) Monteiro, Luis. (2005). What is the accuracy of DGPS? *The Journal of Navigation*, 58(2), 207-225.

4) Hsu, D. A. (2003). An analysis of error distribution in navigation. *The Journal of Navigation*, 32(3), 426 - 429.

5) Džunda, M., Čikovský, S. & Melniková, L. (2023). Model of the Signal of the Galileo Satellite Navigation System. *TransNav, International journal on marine navigation and safety of sea transportation*. 17(1), 51-59. DOI: 10.12716/1001.17.01.04.

6) Sikirin, V.E. (2016). Opisaniye navigatsionnykh pogreshnostei s pomoschyu obobschenogo raspredeleniya Puassona. [Description of navigation errors by the generalized distributing of Puasson]. *Sudovozhdenie [Navigation]*, (26), 152 –156.

7) Astaikin, D.V., Sikirin, V.E., Vorokhobin, I.I. & Alekseichuk, B.M. (2017). *Otsenka tochnosti koordinat sudna pri izbytochnykh izmereniyakh* [Estimation of exactness of coordinates of ship at the surplus measuring]. LAP LAMBERT Academic Publishing.

8) Бурмка, І.О., Алексейчук, Б.М. (2023). Точність координат визначення місця судна, розрахованих методом найменших квадратів, у разі надмірних вимірів. Судноводіння | Shipping & Navigation, (35), 10-21. DOI: 10.31653/2306-5761.35.2023.10-21.

9) Vorokhobin, I.I. (2019). *Razrabotka teorii i metodov otsenki povysheniya nadezhnosti sudovozhdeniya* [Development of the theory and methods for assessing the enhancement of navigation reliability]. NU "OMA".

10) Astaikin, D.V. (2014). Smeshanye zakony raspredeleniya veroyatnostei sluchainykh pogreshnostei navigatsionnykh izmereniy. [Mixed probability distribution laws for random errors in navigation measurements]. *Sudovozhdenie [Navigation]*, (24), 7 –14.

- 11) Bober, R., Grodzicki, P., & Wolski, A. (2005). The DGPS system improve safety of navigation within the port of Szczecin. In the 12 Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. 192-194.
- 12). Malić, E , Sikirica, D., Špoljar N. & Filjar, R. (2023). A Method and a Model for Risk Assessment of GNSS Utilisation with a Proof-of-Principle Demonstration for Polar GNSS Maritime Applications. TransNav, International journal on marine navigation and safety of sea transportation. 17(1), 43-50. DOI: 10.12716/1001.17.01.03.
- 13). Masayoshi, Kubo, Shigeki, Sakakibara, Yoshimi, Hasegawa & Tadao, Nagaoka. (2001). Research of method of calculation of probability of collision of ship with the rectangular bull of bridge at tearing down by wind and flow. Japan Institute of Navigation. (104), 225-233.
- 14) Džunda, M., Čikovský, S. & Melniková, L. (2023). Model of the Random Phase of Signal E6 of the Galileo Satellite Navigation System. TransNav, International journal on marine navigation and safety of sea transportation. 17(1), 61-68. DOI: 10.12716/1001.17.01.05.
- 15) Алексейчук, Б.М., Мельник, О.М. (2025). Визначення ефективних координат судна по пеленгам та дистанціям декількох орієнтирів. Судноводіння | Shipping & Navigation, (38), 64-75. DOI: 10.31653/2306-5761.37.2025.64-75.
- 16) Алексейчук, Б.М. (2024). Залежність точності обсервації від суттєвих чинників та шляхи її покращання. Судноводіння | Shipping & Navigation, (36), 10-19. DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.10-19.