

## ФОРМУВАННЯ ПОЛЯ ТОЧНОСТІ ОБСЕРВАЦІЇ СУДНА ЗА ДЕКІЛЬКОМА ОРІЄНТИРАМИ

**Жуков Д. С.**, КДП, старший викладач кафедри «Управління судном», Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: dsz@onma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7843-9131;

**Алексейчук Б. М.**, старший викладач кафедри «Управління судном», Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: navi.dane4ka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1043-5174.

*У роботі відмічається, що наявність навігаційних перешкод у вигляді мілін обумовлюють підвищений рівень навігаційної аварійності при плаванні суден у стислих водах. Похибки навігаційних вимірювань та маневрування судна породжують ризики навігаційної аварійності. У стислих водах також відбувається інтенсивне судноплавство, що веде до виникнення ситуацій небезпечного зближення і ризиків зіткнення.*

*Дуже суттєвим чинником, що впливає на безпеку судноводіння, особливо в районах з ненадійним прийомом сигналу супутникових навігаційних систем, є характеристики точності визначення місця судна по навігаційним орієнтирам.*

*Для формування поля точності обсервації судна, яке створюється декількома орієнтирами необхідно застосувати скалярну міру точності кожної з точок прибережного району плавання судна. Найбільш відповідною характеристикою для такої міри точності є дисперсія модуля векторіальної похибки.*

*Приведено вираз показника точності для випадку вимірювань дистанції і пеленгу кожного орієнтиру, похибки ліній положення яких мають нормальний закон розподілу.*

*Для формування поля точності обсервації судна в районі його плавання проводилось імітаційне комп'ютерне моделювання.*

*Значення скалярного показника точності розраховувалося для двох, трьох та чотирьох орієнтирів, і за його значенням визначалася ступінь затіненості елементарної ділянки поля точності, причому зі зростанням показника затіненість збільшується. Також передбачено можливе оцифрування поля точності, яке відображається на електронній карті із нанесенням значень показника.*

*Ключові слова:* безаварійність судноводіння; навігаційна безпека; поле точності; імітаційне комп'ютерне моделювання.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.069-079**

**Вступ.** Проблема забезпечення безпечного судноплавства в умовах стислих вод є однією з ключових у сфері навігаційної безпеки. Високий рівень аварійності в таких районах обумовлюється низкою чинників, серед яких особливо виділяються наявність навігаційних перешкод, обмеженість маневрового простору, інтенсивне судноплавство, а також похибки навігаційних вимірювань. У результаті цього виникають ситуації небезпечного зближення суден і підвищується ризик зіткнень та посадки на міліну. З огляду на це, підвищення точності визначення координат судна та своєчасне виявлення зон підвищеного ризику стає актуальним завданням для сучасної навігаційної практики.

Особливо гостро питання точності постає в умовах ненадійного приймання сигналів GNSS, де основним джерелом інформації про положення судна стають навігаційні орієнтири. У таких ситуаціях ефективно судноводіння неможливе без урахування просторово змінної точності визначення місця судна, що пов'язана з конфігурацією орієнтирів, типом ліній положення (пеленг, дистанція), імовірнісними властивостями похибок.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями.**

Дуже суттєвим чинником, що впливає на навігаційну безпеку, є саме точність обсервації положення судна у заданому районі. Традиційні навігаційні засоби – такі як ЕКНІС, АІС, ЗАРП – забезпечують комплексне відображення навігаційної ситуації, але не дають інформації про точність координат, що може ввести судноводія в оману в критичній ситуації. Саме тому існує потреба у вдосконаленні відображення навігаційної ситуації шляхом візуалізації поля точності обсервації судна на електронній карті.

Для формування такого поля необхідно використати скалярну міру точності, яка дозволяє кількісно оцінити дисперсію модуля векторної похибки в кожній точці району плавання. Це вимагає створення математичної моделі, що враховує коваріаційні характеристики вимірювань пеленгів і дистанцій, закон розподілу похибок та їх ефективність, а також просторову конфігурацію навігаційних орієнтирів.

Отже, постає необхідність у розробці методу формування поля точності навігаційної обсервації, який базується на поєднанні статистичних характеристик похибок і моделюванні їх впливу на координатну невизначеність. Такий підхід дозволить надати судноводієві інтуїтивно зрозумілу інформацію про надійність його місцеположення та адаптивно змінювати траєкторію з урахуванням зон мінімальних похибок, що сприятиме підвищенню рівня навігаційної безпеки в складних умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми.**

Значна кількість робіт по тематиці безпеки мореплавання присвячена проблемі забезпечення безаварійності судноводіння, що має ряд складових, кожна з яких направлена на зниження впливу суттєвого чинника аварійності.

У роботах [1–7] відображені розробка і використання інформаційних систем імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями.

Інтелектуальну систему прогнозування руху судна, що імітує процес навчання автономного блоку управління, створеного за допомогою штучної нейронної мережі розглянуто в роботі [1]. Блок управління надає вхідні сигнали і вираховує значення необхідних маневрових параметрів судна в стислих водах.

Як відзначається в роботі [2], у комп'ютерних системах для безпечного плавання суден використовуються прогнозні інструменти руху суден, які успішно застосовуються протягом тривалого часу. Але спрощені наявні прогнози обмежують їх використання для негайного поточного відображення руху судна в разі зміни положення керма та обертів двигуна. Необхідна точність реалізації криволінійної траєкторії руху судна може бути забезпечена більш удосконаленими прогнозованими моделями руху судна.

Питанням ідентифікації судових моделей маневрування присвячена робота [3], яка призначена для дослідження маневреності судна, проектування системи управління рухом суден та сприяють розвитку системи управління судовими тренажерами. У роботі створена нелінійна модель маневрування судна. Для оцінки параметрів моделі пропонується алгоритм, заснований на розширеній теорії фільтра Калмана.

У роботі [4] розглянуто розробку інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями, залежно від кута кладки керма й обертів двигуна, яка має забезпечити новий тип планування маневру судна і контроль реалізації завданого маневру. У процесі маневрування система повинна відображати завдані маневри одночасно з фактичним рухом судна та з індикацією прогнозованої траєкторії, яка визначається реальними даними від датчиків судна.

У роботах [5, 6] розглянуто питання врахування характеристик поворотності судна при розрахунку параметрів його повороту та забезпечення необхідної точності повороту судна способом переміщення його криволінійної траєкторії, які використовуються в запропонованій інформаційній системі управління судном.

У роботі [7] наведено математичні моделі зміни курсу судна при повороті без урахування часу переключення пера керма. Всього представлено три моделі різного ступеня адекватності реального процесу повороту і виявлено відповідність математичних моделей експериментальним натурним спостереженням конкретних суден.

Метод оцінки навігаційної безпеки при провідці судна стислим маршрутом запропоновано в роботах [8, 9], який дає можливість заздалегідь визначити вірогідність безаварійної провідки вибраним маршрутом, межі якого формалізуються за допомогою

електронної карти. При цьому, як показано в роботі [10], враховується закон розподілу похибки бокового відхилення від програмної траєкторії руху.

Одним із найбільш важливих чинників аварійності являється зіткнення суден, для попередження яких розроблено різні системи прийняття рішень, чому присвячено значне число робіт.

Монографія [11] присвячена особливостям розходження суден шляхом зміщенням на лінію паралельну шляху переміщення.

Теоретичне обґрунтування системи ухилення від зіткнення для автономних суден викладено у роботі [12], в якій представлено алгоритм вибору маневру розходження. Приведено вимоги до автономного судноводіння, які ураховують фактори, що впливають на процес розходження. Відмічається, що вирішення задач автоматизації управління судном проводяться у класичному чи комп'ютерному варіанті. Класичний варіант використовує математичні моделі, а при комп'ютерному варіанті залучені методи штучного інтелекту.

У роботі [13] було запропоновано графічні інструменти для полегшення вибору, оцінки та коригування дій запобігання зіткнення в ситуаціях з рухомими та нерухомими перешкодами, припускаючи, що такі ситуації не є екстремальними або звичайними для вітрильних суден і що цільові параметри руху є постійними або їх майбутня зміна відома. Розглядався вибір комбінованого Z-маневру ухилення (зміна курсу і швидкості в одній точці та повернення до вихідних значень цих параметрів в іншій точці) і однієї комбінованої дії (зміна курсу і швидкості у вибраній точці). Розроблені графічні засоби містять діаграми, що відображають вісім зон дій, і спеціальні позначки цілей у момент їх максимального наближення до власного судна. З огляду на COLREG і хорошу морську практику, ці зони були розташовані в порядку пріоритету застосування. Для побудови діаграм використано результати перерахування репрезентативної дискретної множини можливих варіантів маневру.

Основним методам автоматичного визначення маневру розходження суден присвячені статті [14, 15], в яких також приведено результати проведеного аналізу.

У роботі [16] представлено спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями з графічним відображенням вибраного маневру розходження, а в роботі [17] запропоновано розробку судової інформаційної системи запобігання зіткнень з урахуванням навігаційних перешкод, для чого використовуються електронні карти.

Посадка на міліну та зіткнення все ще становлять найвищий відсоток морських аварій, незважаючи на поточну увагу до морської освіти та навчання та покращення можливостей датчиків зазначається в статті [18]. Зіткнення відбувається через людську помилку з наслідками від помірних до серйозних, зі значним впливом як на навколишнє середовище, так і на життя на морі. У цьому документі короткі статистичні дані щодо людського фактора, як першопричини морських інцидентів, разом із неправильним розумінням правил зіткнень представлені як базовий розділ. Крім того, у цій роботі обговорюється архітектура системи підтримки прийняття рішень, щоб запропонувати відповідні дії, коли виявлено ризик потенційного зіткнення. Запропонована система архітектури базується на різних модулях, інтегрованих із відповідними вхідними даними датчиків щодо навколишньої зони навігації. Як наслідок, інструмент може підтримувати вахтових офіцерів у процесі прийняття рішень, надаючи завчасні пропозиції відповідно до положень про зіткнення. Запропонована система призначена для використання на борту незалежно від ступеня автоматизації судна, і вона базується на АІС, яка є обов'язковою, що робить її широко застосовною. Правильне використання системи може значно зменшити кількість зіткнень, як продемонстрували отримані результати.

**Метою дослідження** є розробка методу формування поля точності обсервації судна за декількома орієнтирами й апробація математичної моделі формування та відображення на електронній карті поля точності обсервації судна, що враховує кількість, тип та розташування навігаційних орієнтирів, а також імовірнісну природу похибок навігаційних вимірювань.

Для досягнення мети дослідження, слід виконати ряд наступних завдань:

1. Розробити математичну модель формування поля точності обсервації судна, що враховує коваріаційні характеристики похибок пеленгів і дистанцій до орієнтирів, з урахуванням різних законів розподілу навігаційних похибок.

2. Обґрунтувати вибір скалярного показника точності як критерію оцінки модуля векторної похибки положення судна та забезпечити його обчислення для довільної конфігурації орієнтирів.

3. Розробити алгоритм і програмну реалізацію імітаційного моделювання поля точності в районі плавання судна для різної кількості орієнтирів, з урахуванням змішаного розподілу похибок.

4. Реалізувати візуалізацію результатів моделювання шляхом накладання оцифрованого поля точності на електронну навігаційну карту та провести аналіз впливу кількості та розташування орієнтирів на рівень позиційної точності.

**Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** З розвитком інформаційних комп'ютерних технологій синтез навігаційної ситуації дедалі більше покладався на технічні засоби. Поява ЕКНІС, супутникової навігації, АІС та використання ЗАРП забезпечили синтез та відображення навігаційної ситуації комплексно, причому базовим елементом стала електронна карта, на яку наноситься поточна позиція судна, позиції та параметри руху навколишніх цілей як від ЗАРП, так і від АІС. Таке відображення навігаційної ситуації суттєво полегшує судноводію прийняття ефективних рішень щодо забезпечення безаварійного судноводіння.

Однак описане відображення навігаційної ситуації є неповним. Дуже суттєвим чинником, що впливає на безпеку судноводіння, особливо в районах з ненадійним прийманням сигналу супутникових навігаційних систем, є характеристики точності визначення місця судна по навігаційним орієнтирам.

Тому модель відображення навігаційної ситуації потрібно доповнити візуальним відображенням точності обсервації судна в районі його плавання, з тим, щоб можна було оперативно провести коректуру програмної траєкторії руху для підвищення точності контролю місця та вибору найбільш сприятливих умов, що мінімізують позиційні похибки обсервацій судна. Слід зазначити, що для кожної елементарної площини, порівнянної з габаритами судна, у районі його плавання слід розрахувати точності характеристики векторної похибки щодо центру елементарної площини, вибираючи різні поєднання орієнтирів і проводячи індикацію оцінки точності координат і групи орієнтирів, при якій вона досягається.

Візуалізація такого поля точностей у районі руху судна можлива шляхом використання колірною представлення значень критерію точності та накладання такого поля у прозорому режимі на електронну карту. У такому випадку до моделі навігаційної ситуації додається наочна інформація про точність контролю місця судна.

Таким чином, для формування поля точностей обсервації судна необхідно вибрати чисельний (скалярний) показник, що характеризує величину векторіальної похибки в довільній позиції поля.

Точність обсервації місця судна характеризується коваріаційною матрицею векторної похибки  $K(\Delta X, \Delta Y)$ , де  $\Delta X$  і  $\Delta Y$  – складові векторної похибки. Тому скалярний показник точності повинен визначатись коваріаційною матрицею векторної похибки  $K(\Delta X, \Delta Y)$ .

Розрахунок координат судна при надмірних вимірах методом максимальної правдоподібності забезпечує їх ефективні оцінки. У цьому випадку другі центральні моменти (дисперсії) і змішані моменти коваріаційної матриці мають мінімальні значення, тому матриця векторної похибки, отримана зазначеним методом, позначена  $K(\Delta X, \Delta Y)_{\min}$ . У роботах [19, 20] показано, що коваріаційна матриця у разі, коли точність ліній положення різна, має такий вигляд:

$$K(\Delta X, \Delta Y)_{\min} = \frac{1}{\Delta_r} \left\| \begin{array}{cc} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i & - \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ - \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i \end{array} \right\|,$$

де  $n$  – число ліній положення;

$\alpha_i$  – напрямок градієнта  $i$ -ї лінії положення;

$$\Delta_r = \left[ \left( \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \right) \left( \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right]; \quad s_i = \int_{R1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f(\xi_i) \right]^2}{f(\xi_i)} d\xi_i.$$

В останньому виразі  $f(\xi_i)$  – щільність розподілу похибки  $i$ -ї лінії положення. Діагональні елементи коваріаційної матриці є дисперсіями  $D_x$  і  $D_y$  та складових  $\Delta X$  та  $\Delta Y$  векторіальної похибки. Їх сума дисперсією модуля вектора позиційної векторної похибки  $D_{md}$ , тобто  $D_{md} = D_x + D_y$ .

Кожен із орієнтирів забезпечує можливість отримання двох ліній положення (вимірюванням пеленгу та дистанції). Оскільки кожна пара містить різнорідні лінії положення, то їх похибки  $\xi_1$  і  $\xi_2$  є незалежними та різноточними. У цьому випадку вирази для дисперсій  $D_x$  і  $D_y$  коваріаційної матриці мають такий вигляд [21]:

$$D_x = \frac{1}{\tilde{\Delta}_r} \sum_{i=1}^N [s_{Di} \sin^2 \alpha_{bi} + s_{Pi} \cos^2 \alpha_{bi}];$$

$$D_y = \frac{1}{\tilde{\Delta}_r} \sum_{i=1}^N [s_{Di} \cos^2 \alpha_{bi} + s_{Pi} \sin^2 \alpha_{bi}];$$

де

$$\tilde{\Delta}_r = \left[ \left( \sum_{i=1}^N s_{Di} \cos^2 \alpha_{bi} + \sum_{i=1}^N s_{Pi} \sin^2 \alpha_{bi} \right) \left( \sum_{i=1}^N s_{Di} \sin^2 \alpha_{bi} + \sum_{i=1}^N s_{Pi} \cos^2 \alpha_{bi} \right) - \left[ \sum_{i=1}^N (s_{Di} + s_{Pi}) \sin \alpha_{bi} \cos \alpha_{bi} \right]^2 \right]$$

$$s_{Di} = \int_{R1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Di}(\xi_i) \right]^2}{f_{Di}(\xi_i)} d\xi_i, \quad s_{Pi} = \int_{R1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Pi}(\xi_i) \right]^2}{f_{Pi}(\xi_i)} d\xi_i,$$

причому  $f_{Di}(\xi_i)$  і  $f_{Pi}(\xi_i)$  – щільність розподілу ймовірностей похибок ліній положення відповідно по дистанції та пеленгу.

У разі нормального розподілу похибок ліній положення невласні інтеграли  $s_{Di}$  і  $s_{Pi}$  мають вигляд [22]:

$$s_{Di} = \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} \quad \text{і} \quad s_{Pi} = \frac{1}{\sigma_{Pj}^2},$$

де  $\sigma_{Dj}^2$  і  $\sigma_{Pj}^2$  – дисперсії похибок ліній положення дистанції і пеленга.

Для формування поля точності обсервації судна, яке створюється декількома орієнтирами, як раніше зазначалося, необхідно застосувати скалярну міру точності кожної з точок прибережного району плавання судна. Найбільш відповідною характеристикою для такої міри точності є дисперсія модуля векторіальної похибки  $D_{md}$ .

У роботі [21] приведений вираз для показника точності  $D_{md}$  для випадку вимірювань дистанції і пеленгу кожного орієнтиру і розподілу похибок ліній положення за нормальним законом:

$$D_{md} = \frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pj}^2} \right)}{\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \left( \frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Pj}^2} \right) \sin^2 \beta_{ij} + \left( \frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Pj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Dj}^2} \right) \cos^2 \beta_{ij} \right] \right\}} \quad (1)$$

де  $N$  – число орієнтирів;

$\beta_{ij}$  – горизонтальний кут між  $i$ -м і  $j$ -м орієнтирами.

У роботі [22] зазначається, що похибки навігаційних вимірювань  $\xi$  у вибірці підпорядковуються змішаному закону розподілу, щільність якого має такий вигляд:

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

де  $A_m$  – нормуючий множник, причому  $A_m = \frac{2^{2m} (m!)^2}{\sqrt{2\pi} (2m)!} \lambda^{m+1/2}$ ;

$m$  – суттєвий параметр, який набуває цілих чисел;

$\lambda$  – масштабний параметр.

У роботі [22] показано, що при розрахунку обсервованих координат методом найменших квадратів у випадку, коли випадкові похибки навігаційних вимірювань розподілені за змішаним законом, відбувається втрата їх точності, а ефективність оцінки  $e$  оцінки менше одиниці, а її значення залежно від істотного параметра  $m$  розраховуються за формулою:

$$e = 1 - \frac{3}{2m^2 + 3m + 1}. \quad (2)$$

Значення ефективності  $e$ , розраховані за допомогою виразу (2), наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Ефективність змішаного розподілу першого типу

$m$	1	2	3	4	5	6
$e$	0,5	0,8	0,893	0,934	0,955	0,968

Тому в цьому випадку величину скалярного показника точності  $D_{md}$ , розрахованого за формулою (1), необхідно розділити на значення ефективності  $e$ .

Для формування поля точності обсервації судна в районі його плавання проводилось імітаційне комп'ютерне моделювання.

Значення скалярного показника точності розраховувалося за допомогою виразу (1) для двох, трьох та чотирьох орієнтирів, і за його значенням визначалася ступінь затіненості елементарної ділянки поля точності, причому зі зростанням  $D_{md}$  затіненість збільшується.

Також можливе оцифрування поля точності, яке відображається на електронній карті із нанесенням значень  $D_{md}$  у квадратних метрах. Для розрахунку величини  $D_{md}$  приймалися

значення  $\sigma_D = 20$  м і  $\sigma_P = 0,5^\circ D$ . На рис. 1 показана електронна карта району плавання судна.

Поле точності обсервацій судна при застосуванні двох орієнтирів показано на рис. 2.

Аналіз поля точності, що породжується двома вибраними орієнтирами, показує, що мінімальна дисперсія модуля траєкторної похибки в районі входу в порт становить  $25$  м<sup>2</sup>, а на відстані до 8 миль дисперсія не гірша за  $50$  м<sup>2</sup>.

Чисельний розподіл значень показника точності в межах електронної картки для використання трьох орієнтирів наведено на рис. 3.

Проводячи аналіз точності поля, яке створюють три орієнтири, відзначаємо, що мінімальна дисперсія модуля векторіальної похибки дорівнює 17–18 м<sup>2</sup> у районі входу в порт, і вона не гірша за 50 м<sup>2</sup> на відстані до 10 миль.

На рис. 4 наведено графічний та чисельний розподіл поля точності чотирьох орієнтирів у заданому районі.

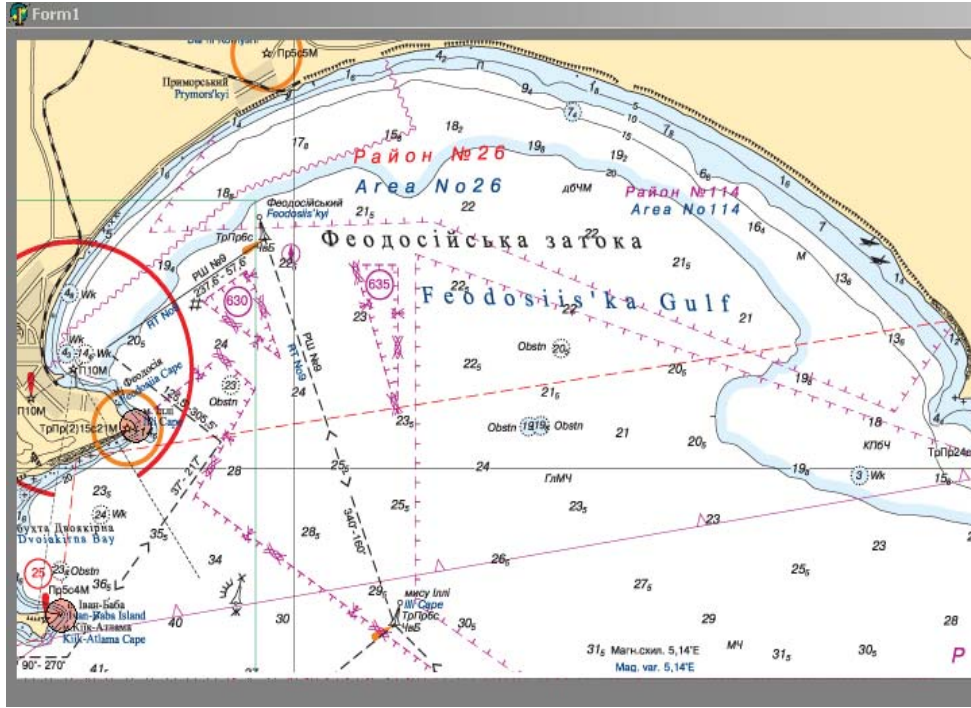


Рисунок 1 – Електронна карта району плавання судна

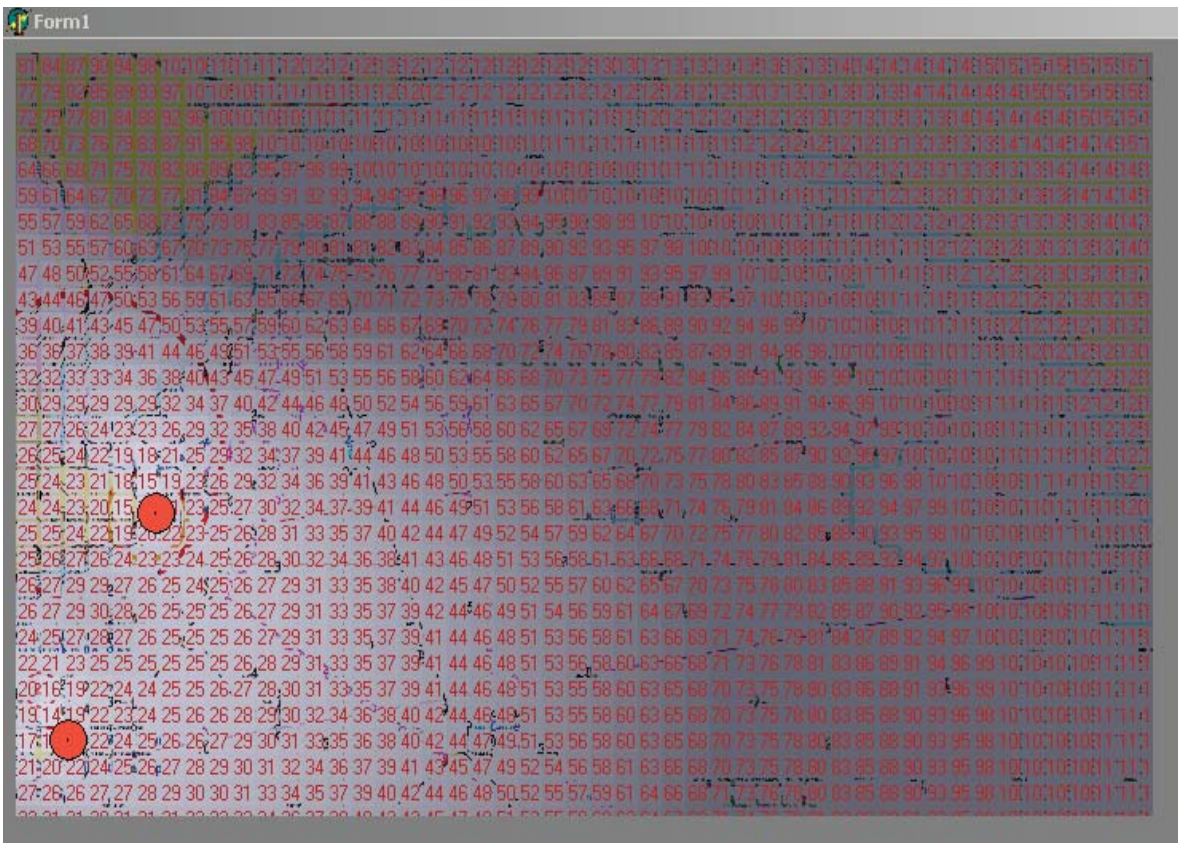


Рисунок 2 – Оцифрування поля точності для двох орієнтирів

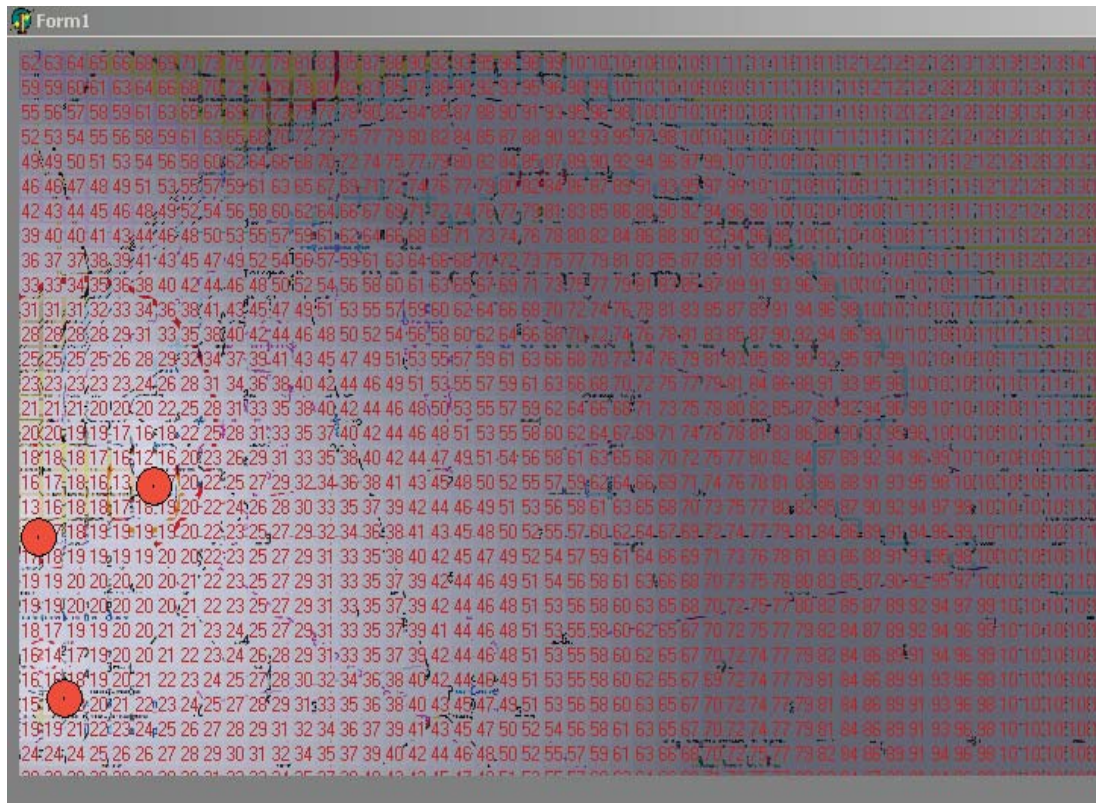


Рисунок 3 – Поле точності трьох орієнтирів

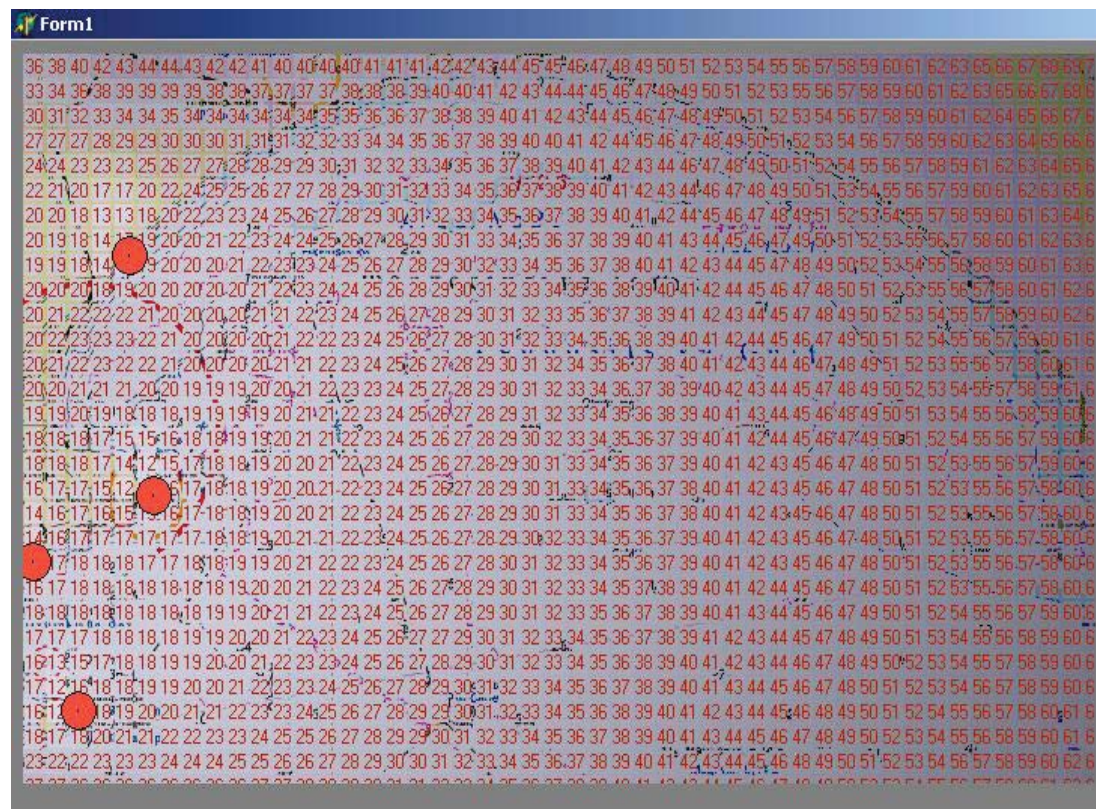


Рисунок 4 – Відображення поля точності для чотирьох орієнтирів

Графічне відображення розподілу точностей у разі використання чотирьох орієнтирів показує зростання точності для точок всього району. Чисельне значення розподілу показує, що по всій електронній карті максимальне значення показника точності (дисперсії модуля векторної похибки) вбирається у 70 м<sup>2</sup>, що відповідає граничній похибці 25 м.



**Висновки.** У результаті проведеного дослідження удосконалено метод формування поля точності обсервації судна по декількох орієнтирам з використанням електронної карти. Запропоновано застосування скалярного показника поля точності обсервації судна за двома, трьома та чотирма орієнтирами. Проведене імітаційне комп'ютерне моделювання поля точності обсервації судна по двох, трьох і чотирьох орієнтирах підтвердило доцільність практичного застосування розробленого способу формування поля точності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ljacki M. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering, *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.17>, pp. 511–516, 2016.
2. Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Baldauf M. Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25–30, 2009.
3. Shi C. J., Zhao D., Peng J., Shen C. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105–110, 2009.
4. Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Schaub M., Baldauf M., Klaes S. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, <https://doi.org/10.12716/1001.08.01.15>, pp. 131–141, 2014.
5. Калініченко Є. В. Облік характеристик поворотності при розрахунку параметрів повороту судна, *Водний транспорт*. №2 (20), с. 63–67, 2014.
6. Калініченко Є. В. Забезпечення необхідної точності повороту судна способом переміщення його криволінійної траєкторії, *Автоматизація судових технічних засобів*, № 20, с. 52–58, 2014.
8. Ворохобін І. І., Козак Ю. В., Северин В. В. Оцінка навігаційної безпеки під час плавання суден у стиснених водах. Saarbrucken, Deutschland: – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
9. Северин В. В. Оцінка ймовірності безпечного проведення судна стиснутим маршрутом, *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, с. 94–98, 2017.
10. Ворохобін І. І. Вплив закону розподілу похибки бічного відхилення на ймовірність безпечного проходження судном стисненого маршруту, *East European Scientific Journal*, №5 (33), с. 30–37, 2018.
11. Вагущенко Л. Л. Розбіжність із суднами зміщенням на паралельну лінію колії, Одеса: Фенікс, 2013.
12. Thomas Statheros, Gareth Howells, Klaus McDonald-Maier, Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques, *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129–142, 2008.
13. Vagushchenko L., Vagushchenko A. Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.17.03.14>, pp. 625–633, 2023.
14. Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R. R. & P. H. van Gelder, Ship collision avoidance methods: State-of-the-art, *Safety Science*, nn. 121, pp. 451–473, 2020.
15. Lazarowska A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing, *Remote Sens*, nn.13, pp. 32–65, 2021.
16. П'ятаков В. Е., Петриченко О. А., Калюжний В. В. Спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями, *Автоматизація судових технічних засобів*, № 24. с. 81–87, 2018.

17. Петриченко Є. А., Петриченко О. А. Розробка суднової інформаційної системи попередження зіткнень, Судноводство, Вип. 28, с. 120–130, 2018.
18. Martelli M., Žuškin S., Zaccone R., Rudan I. A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, <https://doi.org/10.12716/1001.17.02.11>, pp. 347–353, 2023.
19. Мудров В. М., Кушко В. Л., Методи обробки вимірювань, М: Радянське радіо, 1976.
20. Степаненко В. В. Ефективність оцінки параметрів ситуації небезпечного зближення судів, Судноводство, Вип. 2, с. 201–209, 2000.
21. Бузовський Д. А. Залежність точності критерію радіолокаційної системи зверненого типу від її структури / Бузовський Д. А. // Судноводство. 2006. № 11. С. 14–19.
22. Астайкін Д. В., Сікірін В. Є., Ворохобін І. І. та Олексійчук Б. М. Оцінка точності координат судна за надмірних вимірів. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017.

## REFERENCES

1. Ljacki, M. (2016). Intelligent Prediction of Ship Maneuvering, *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.17>, pp. 511–516.
2. Benedict, K., Kirchhoff, M., Gluch, M., Fischer, S., Baldauf, M. (2009). Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25–30.
3. Shi, C. J., Zhao, D., Peng, J., Shen, C. (2009). Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105–110.
4. Benedict, K., Kirchhoff, M., Gluch, M., Fischer, S., Schaub, M., Baldauf, M., Klaes, S. (2014). Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, <https://doi.org/10.12716/1001.08.01.15>, pp. 131–141.
5. Kalinichenko, Y. V. (2014). Accounting for turning characteristics when calculating vessel turning parameters, *Vodniy transport*. №2 (20), pp. 63–67.
6. Kalinichenko, Y. V. (2014). Ensuring the required accuracy of vessel turning by moving its curved trajectory, *Avtomatizatsiya sudovyh tehnicheskih sredstv*, № 20, pp. 52–58, 2014.
7. Kalinichenko, Y., Burmaka, I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(84), <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839>, pp. 20–31.
8. Vorokhobin, I. I., Kazak, Y. V., Severin, V. V. (2018). *Assessment of navigation safety when vessels are sailing in confined waters*. Saarbrucken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing.
9. Severin, V. V. (2017). Assessment of the probability of safe vessel navigation along a confined route, *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, pp. 94–98.
10. Vorokhobin, I. I. (2018). The influence of the law of distribution of lateral deviation error on the probability of safe passage of a vessel along a confined route, *East European Scientific Journal*, №5 (33), pp. 30–37.
11. Vagushchenko, L. L. (2013). *Divergence with vessels by shifting to a parallel track line*, Odesa: Feniks, 2013.
12. Thomas Statheros, Gareth Howells, Klaus McDonald-Maier (2008). Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques, *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129–142.

13. Vagushchenko, L., Vagushchenko, A. (2023). Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.17.03.14>, pp. 625–633.
14. Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R. & P. H. van Gelder (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art, *Safety Science*, nn. 121, pp. 451–473.
15. Lazarowska, A. (2021). Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing, *Remote Sens*, nn.13, pp. 32–65.
16. Pyatakov, V. E., Petrychenko, O. A., Kalyuzhniy, V. V. (2018). Method of successive divergence of a vessel with two dangerous targets, *Avtomatizatsiya sudovyh tehnycheskikh sredstv*, № 24. pp. 81–87.
17. Petrychenko, E. A., Petrychenko, O. A. (2018). Development of a ship's information system for collision avoidance, *Sudovozhdenie*, Vyp. 28, pp. 120–130.
18. Martelli, M., Žuškin, S., Zaccone, R., Rudan, I. (2023). A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, <https://doi.org/10.12716/1001.17.02.11>, pp. 347–353.
19. Mudrov, V. M., Kushko, V. L. (1976). *Methods of treatment of measurements*, M.: Sovetskoe radio.
20. Stepanenko, V. V. (2000). Efficiency of assessing the parameters of the situation of dangerous approach of ships, *Sudovozhdenie*, Vyp. 2, pp. 201–209.
21. Buzovsky, D. A. (2006). Dependence of the accuracy criterion of the reverse-type radar system on its structure, *Sudovozhdenie*, Vyp. 11, pp. 14–19.
22. Astayrin, D. V., Sikirin, V. E., Vorokhobin, I. I. and Alekseychuk, B. M. (2017). *Estimation of exactness of coordinates of ship at the surplus measuring*. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing.

**Zhukov D. S., Aliksieichuk B. M. FORMATION OF THE SHIP'S OBSERVATION ACCURACY FIELD USING MULTIPLE LANDMARKS**

*Abstract. This paper highlights the fact that the presence of navigational obstacles, such as shoals, significantly increases the risk of maritime accidents when vessels operate in confined or restricted waters. Such obstacles create unpredictable conditions where the margin for navigational error is minimal. Errors in navigational measurements, as well as inaccuracies in ship maneuvering, contribute to heightened risks of grounding, collision, and close-quarter situations. In areas with high traffic density, the danger is further amplified, increasing the likelihood of navigational conflicts and incidents.*

*A particularly critical factor affecting navigational safety, especially in zones with unreliable reception of satellite navigation signals, is the accuracy of determining a vessel's position using traditional navigation landmarks. In such cases, reliance on visual or radar-based observation becomes essential. Therefore, it is important to assess how accurately the position of a ship can be determined when using multiple fixed landmarks.*

*To develop an observation accuracy field for a vessel, based on several landmarks, a scalar accuracy measure is applied to each point within the coastal navigation area. The most appropriate measure for this purpose is the dispersion of the modulus of the vector error. This measure provides a quantitative indicator of how precisely the vessel's location can be determined based on the geometry and accuracy of the observations.*

*An analytical expression for the accuracy index is presented for cases involving distance and bearing measurements to each landmark, assuming normally distributed errors along position lines. To visualize the field of observation accuracy across a navigational area, a computer simulation model was created.*

*The scalar accuracy index was calculated for scenarios involving two, three, and four landmarks. The index value influences the degree of shading applied to each grid section in the accuracy field, darker shading corresponds to higher accuracy indices. The resulting accuracy field can be digitized and displayed on an electronic chart, offering mariners a visual representation of positional confidence throughout the area.*

**Key words:** accident-free navigation; navigational safety; accuracy field; computer simulation modeling.

© Жуков Д. С., Алексейчук Б. М.

Статтю прийнято до редакції 01.05.2025