

*Ганношина І.М., Калініченко Т.В., Нікітін П.В.*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ, ПОШУКУ ТА СУПРОВОДЖЕННЯ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ**

*У ході дослідження систематизовано проблеми, здійснено класифікацію методів пошуку та супроводження об'єктів на морі, які дозволяють виділити часткові та загальні підходи вирішення пошукових завдань у різних умовах з метою формалізації моделей пошукових процесів і процесів. Проведено дослідження методів пошуку, введено поняття пошукової одиниці, проведено теоретично-множинне обґрунтування районів та умов пошуку. Обґрунтовано доцільність та розроблено технології множинного аналізу формування навігаційної обстановки, районів та умов пошукових операцій як універсального математичного апарату планування пошукових дій та супроводження об'єктів пошуку. Розроблені принципи імовірнісної оцінки пошукових процесів. Теоретичним дослідженням та комп'ютерним моделюванням методів пошуку та супроводження морських динамічних об'єктів встановлено найбільш придатні роздільні за параметрами та комбіновані моделі супроводження та прогнозування руху об'єкта пошуку з оцінкою дій дрейфу, течії. Обґрунтовано доцільність та апробовано алгоритми згладжування та оцінювання кінематичних елементів руху об'єкта, що супроводжується часовим рядом вимірювань з використанням експоненційного фільтра за трьома вимірами з адаптацією за поточними вимірами. Розроблено технологію фільтрації та оцінювання кінематичних елементів руху та супроводження об'єкта, на підставі  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтра та сформовано алгоритми адаптації коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтра за поточними вимірюваннями параметрів.*

**Ключові слова:** методи, прогнозування, пошук, супроводження, морські динамічні об'єкти.

Завдання пошуку та супроводження морських об'єктів має багатоаспектне значення як в теорії навігації, так і в теорії прийняття рішень, а галузь застосування відповідних методів та моделей відноситься до пошуково-рятувального забезпечення, забезпечення навігаційної безпеки та ведення бойових (спеціальних) дій. Математичні моделі пошуку на морі достатньо складні та вимагають певних алгоритмічних обчислень, отже доцільно задачі пошуку розглядати у складі систем підтримки прийняття рішення (СППР) або автоматизованих систем управління (АСУ) розвідкою.

Метою дослідження є підвищення ефективності пошуку та супроводження морських об'єктів за рахунок розроблення відповідних моделей та методів зі складу СППР.

У процесі пошуку використання засобів виявлення поєднується з активним маневром носія цих засобів. Отже, вивчення закономірностей взаємного руху спостерігача та об'єкта пошуку стає особливо важливим. Ці закономірності є невід'ємною частиною теорії пошуку – кінематики пошуку. Мається на увазі, що кінематичні характеристики пошукових об'єктів можуть бути відомі та можуть бути оцінені на основі вимірювань.

Одним з найважливіших показників ефективності пошукової операції, а також експлуатації суднових та берегових систем управління рухом суден (СУРС), контролю, забезпечення безпеки мореплавання є відстеження та супроводження об'єктів спостереження. У морі об'єкти переміщуються від дії власних двигунів та під впливом постійної течії, вітру, хвилювання. Операції супроводження дозволяють проводити аналіз, оцінювати параметри та траєкторії руху різних морських динамічних об'єктів, контролювати їх маневри та діяльність. При цьому вирішуються задачі фільтрації,

згладжування, прогнозування (екстраполяції) траєкторних параметрів за динамічними, кінематичними та статистичними моделями прогнозованих процесів з урахуванням сумарного зносу [1-5].

Основною характеристикою супроводження та отримання прогнозних параметрів руху об'єктів на морі, які вимірюються, можуть бути:

- 1) координати об'єкта географічні (широта, довгота) або пласкі прямокутні (за меридіаном та паралелями);
- 2) координати об'єкта полярні по відношенню до спостерігача (пеленг, відстань);
- 3) елементи руху об'єкта (істинний курс, швидкість).

Аналіз ряду досліджень [6, 1] свідчить, що при вирішенні завдань пошуку та супроводження об'єктів (морських, високошвидкісних повітряних, наземних), як правило, використовують кінематичні моделі прогнозування їх руху першого порядку, враховуючи швидкість зміни спостерігаемого параметру, або другого порядку, який враховує швидкість та прискорення зміни спостерігаемого параметру. На основі цього та принципів механіки кінематичної моделі іншого окремого супроводжуваного та прогнозованого параметру при руху об'єкту можливо представити у такому вигляді [4,5]:

$$\tilde{X}_i = \tilde{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i; \quad t_i = T_i - T_{i-1}; \quad (1)$$

$$\tilde{X}_i = \tilde{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i + 0,5 \hat{a}_i t_i^2, \quad (2)$$

де  $\hat{V}_i, \hat{a}_i$  – згладжування виміру або оцінки швидкості при прискоренні окремого траєкторного параметру;

$\tilde{X}_i, \tilde{X}_{i-1}$  – прогнозовані та попередні виміряні або згладжені значення окремого траєкторного параметру;

$T_i, T_{i-1}, t_i$  – моменти часу та інтервал між вимірюваннями параметру.

Компоненти швидкості та прискорення руху об'єкта можуть бути представлені сумою, яка становить власний рух та сумарний вплив зовнішнього середовища, похибками вимірювань або оцінкою:

$$\hat{V}_i = \hat{V}_{ui} + \hat{V}_{ci}; \hat{a}_i = \hat{a}_{ui} + \hat{a}_{ci}, \quad (3)$$

де  $\hat{V}_{ui}, \hat{a}_{ui}$  – компоненти власної вимірної швидкості та прискорення об'єкту за допомогою лагу та датчика кутової швидкості;

$\hat{V}_{ci}, \hat{a}_{ci}$  – компоненти швидкості та прискорення сумарного знесення об'єкта від впливу зовнішнього середовища та похибок.

Компоненти швидкості та прискорення сумарного зносу об'єкта від впливу зовнішнього середовища та похибки можуть бути представлені так:

$$\hat{V}_{ci} = \hat{V}_{дi} + \hat{V}_{тi} + \hat{V}_{пi}; \hat{a}_{ci} = \hat{a}_{дi} + \hat{a}_{тi} + \hat{a}_{пi}, \quad (4)$$

де  $\hat{V}_{дi}, \hat{a}_{дi}$  – швидкість та прискорення дрейфу об'єкта під впливом вітру;

$\hat{V}_{тi}, \hat{a}_{тi}$  – швидкість та прискорення зносу об'єкта течією;

$\hat{V}_{пi}, \hat{a}_{пi}$  – швидкість та прискорення об'єкта від дії помилок.

Складові виразу (2.4) можуть посилити або компенсувати один одного. Тому сумарна складова повинна оцінюватися за поточними вимірами.

У результаті завершених досліджень [4, 5], заснованих на комбінації різних варіантів виразів 1-4 у залежності від здатності вимірювати та визначати вхідні вихідні дані можуть

бути сформовані варіанти незалежних за окремими параметрами та ієрархічними комбінаціями з різних параметрів моделі супроводження та прогнозування руху об'єкта спостереження.

Розробляються моделі для прогнозування рухових елементів судна першого порядку типу (1). Ці моделі складаються з незалежних основних кінематичних параметрів: швидкості руху, курсу та географічних координат, які отримані на основі безпосередніх вимірювань та згладжувань на судні або вилучені з приладів судна, як об'єкту спостереження, за допомогою автоматичних ідентифікаційних систем (АІС):

$$\tilde{V}_i = \hat{V}_{i-1} + \hat{a}_i t_i; \tilde{K}_i = \hat{K}_{i-1} + \hat{\omega}_i t_i; \quad (5)$$

$$\tilde{\varphi}_i = \hat{\varphi}_{i-1} + \hat{V}_{\varphi i} t_i; \tilde{\lambda}_i = \hat{\lambda}_{i-1} + \hat{V}_{\lambda i} t_i, \quad (6)$$

де  $\tilde{V}_i, \tilde{K}_i$  – прогнозовані значення швидкості та курсу об'єкта спостереження;

$\hat{K}_{i-1}, \hat{V}_{i-1}$  – попередні виміряні або згладжені значення курсу та швидкості об'єкта спостереження;

$\hat{a}_i, \hat{\omega}_i$  – попередні вимірювання або оцінки лінійного прискорення та кутової швидкості руху об'єкта спостереження;

$\tilde{\varphi}_i, \tilde{\lambda}_i$  – прогнозовані значення широти, довготи об'єктів на поточних моментах часу;

$\hat{\varphi}_{i-1}, \hat{\lambda}_{i-1}$  – попередні виміряні (обсервовані) або згладжені значення широти та довготи об'єкта;

$\hat{V}_{\varphi i}, \hat{V}_{\lambda i}$  – оцінки швидкостей зміни координат (широти, довготи) траєкторії руху об'єкта.

Курс, швидкість, широта та довгота об'єкта спостереження також можуть бути отримані на основі непрямих вимірювань зовнішнім спостерігачем та їх подальших оцінок.

На основі траєкторійних вимірювань (обсервацій) руху об'єкта з'являється можливість отримати додаткову інформацію у вигляді елементів вектора фактичної швидкості об'єкта (щодо ґрунту). Для реалізації цієї мети розглянемо два підходи. Перший пов'язаний з апроксимацією вимірюваних (обсервованих) або згладжених значень широти та довготи при руху об'єкта за локсодромією (при постійних курсах), другий – з використанням швидкості вимірювання широти та довготи руху об'єкта за траєкторією, відповідно:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \hat{\Pi Y} &= \frac{\sum_1^n (\Delta \varphi_{oi} \Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i) / \sum_1^n \Delta \varphi_{oi}^2}{\sum_1^n \left[ \Delta \varphi_{oi}^2 + (\Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i)^2 \right]^{0.5} / \sum_1^n t_i^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \hat{\Pi Y} = \hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i / \hat{V}_{\varphi i}; \hat{V}_{gi} = \left[ \hat{V}_{\varphi i}^2 + (\hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i)^2 \right]^{0.5}, \quad (8)$$

де  $\hat{\Pi Y}, \hat{V}_g$  – оцінки фактичної швидкості та шляхового кута об'єкта по відношенню до ґрунту на прямій лінії;

$\Delta \varphi_{oi}, \Delta \lambda_{oi}$  – виміряні (обсервовані) або згладжені значення приросту широти та довготи при руху об'єкта на локсодромії.

При наявності на судні датчика кутової швидкості, його вимір та прогнозування також пропонується здійснювати на основі типової моделі першого порядку (1), (5), (6):

$$\tilde{\omega}_i = \hat{\omega}_{i-1} + \hat{a}_{\omega i} t_i, \quad (9)$$

де  $\tilde{\omega}_i$  – прогнозовані значення кутової швидкості об'єкта спостереження;

$\hat{\omega}_{i-1}$  – попередні вимірювання або згладжені оцінки кутової швидкості об'єкта спостереження;

$\hat{a}_{\omega i}$  – згладжені оцінки кутового прискорення об'єкта спостереження.

При спільному використанні виразів (5) та (9) виробляється комбінована модель курсу об'єкту, в якій кутова швидкість знаходиться на нижньому рівні ієрархії.

Після підстановки прогнозованої кутової швидкості об'єкта (9) у другому виразі (5) отримується модель супроводження та прогнозування курсу об'єкту другого порядку, типу (2):

$$\tilde{K}_i = \hat{K}_{i-1} + \hat{\omega}_i t_i^2. \quad (10)$$

Більш повний варіант комплексного використання всіх параметрів рядів траєкторних вимірювань для супроводження та прогнозування руху об'єкта пропонується формувати за допомогою традиційних методів аналітичного розрахунку шляху судна [7, 2]. При цьому проєктовані дані перерахованих варіантів моделей курсу та швидкості об'єкта (5)–(8) використовуються елементами нижнього рівня ієрархії в комбінованій моделі прогнозування координат руху об'єкта з урахуванням елементів сумарного зносу та залишкових помилок (3), (4) [4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\varphi}_i &= \hat{\varphi}_{i-1} + (\hat{V}_i \cos \hat{K}_i + \hat{V}_{ci} \cos \hat{K}_{ci}) t_i; \\ \tilde{\lambda}_i &= \hat{\lambda}_{i-1} + (\hat{V}_i \sin \hat{K}_i + \hat{V}_{ci} \sin \hat{K}_{ci} +) t_i \sec \hat{\varphi}_i, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

де,  $\hat{K}_{ci}, \hat{V}_{ci}$  – оцінки значень курсу та швидкості сумарного зносу об'єкта.

Таким чином, модель координат траєкторії об'єкта (11) буде відповідати моделі другого порядку (2), яка містить прогнозовані значення курсу та швидкості від нижнього рівня ієрархії (5)–(10).

З аналізу різних досліджень з мореплавання [7-9] швидкість дрейфу об'єкта залежить від швидкості та курсового кута вітру, швидкості об'єкта, його форми та розміру. Часто в літературі використовується формула:

$$\hat{V}_{Di} = k_{\alpha} W, \quad (12)$$

де  $\hat{V}_{Di}$  – швидкість вітрового дрейфу, вуз;

$k_{\alpha}$  – коефіцієнт дрейфу;

$W$  – швидкість вітряного дрейфу, м/с.

Коефіцієнт дрейфу визначається для кожного конкретного типу судна або плавзасібства.

У морехідних таблицях МТ-2000 швидкість вітрового дрейфу представлена в іншому вигляді:

$$\hat{V}_{Di} = 1,94 k_{\alpha} U, \quad (13)$$

де  $U$  – істина швидкість вітру, м/с.

Значення коефіцієнту вітрового дрейфу приводиться у МТ-2000:

- буй (плавуча міна):  $k_{\alpha} = 0,012 - 0,015$ ;
- шлюпка:  $k_{\alpha} = 0,032 - 0,045$ ;
- катер (рятувальний бот):  $k_{\alpha} = 0,0650$ ;
- судно:  $k_{\alpha} = 0,056 - 0,062$ .

З посібника IAMSAR [10], для розрахунку району, в якому може розташовуватися об'єкт пошуку, необхідно визначити швидкість та напрямок дрейфу, що складається з двох компонентів: дрейфу в підвітряній стороні та сумарної водної течії.

Дані про розмір цих дрейфів, наведені у вигляді таблиці та графіків, вхідних аргументів, в яких є швидкість вітру у вузлах та тип морського динамічного об'єкту.

Швидкість вітрової течії на поверхні моря, як правило, є емпіричною формулою в залежності від швидкості вітру та широти місця:

$$V_{ДТ} = \frac{k_{ТВ}}{\sqrt{\sin \varphi}} U, \quad (14)$$

де  $k_{ТВ}$  – коефіцієнт вітрової течії.

Коефіцієнт вітрової течії визначається з експериментальних спостережень, його величина коливається від 0,04 при швидкості вітру 2 м/с, до 0,012 при швидкості вітру 20 м/с. Найчастіше всього безпосередньо в формулі (14) підставляється значення коефіцієнту вітрової течії 0,0127 [7].

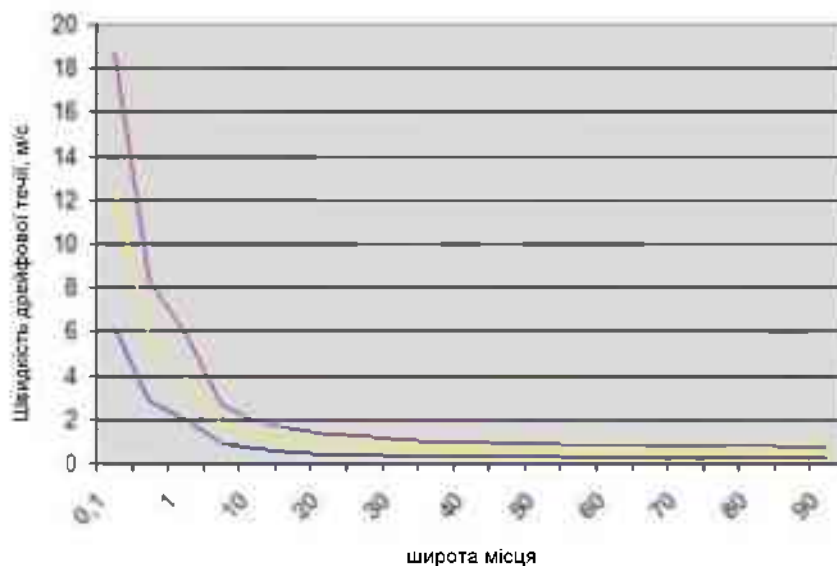
Вітрова течія у відкритому морі відхиляється від напрямку вітру в північній півкулі на  $45^{\circ}$  праворуч, на півдні – на  $45^{\circ}$  ліворуч під впливом відхиляючих сил обертання Землі [19]. Причому це відхилення не залежить ні від швидкості вітру та течії, ні від широти місця.

Для визначення величини вітрової течії, можна використовувати методики (графіки), наведені в посібнику [10]. Однак, аналіз цього графіка свідчить, що він не в повній мірі враховує силу Коріоліса.

Широту, для якої побудовано графік, можна визначити за формулою (14) та даними МТ-2000, які дозволяють виявити, що широта для графіків є змінною величиною та коливається від  $40^{\circ}$  при швидкості вітру 1-2 вузли, до  $2^{\circ}$  при швидкості вітру 33-34 вузли.

На рис. 1 наведені результати розрахунків швидкості дрейфової течії з використанням формули (14) при швидкості вітру 10, 20 та 30 м/с.

З графіків видно, що для широт менше  $20^{\circ}$  використовується формула (14), обмежена через великі похибки.



— 10м/с    — 20м/с    — 30м/с

Рисунок 1 – Графіки швидкості поверхневої дрейфової течії залежно від швидкості вітру та широти місця

З [11] (графік N-1) очевидно, що при вітру 20 вузлів (10 м/с) швидкість вітрової течії становить 0,7 вуз, та з рисунку 1 та виразу (14) слідує, що при вітру 10 м/с, у залежності від широти, швидкість струму вітрової течії становить від 0,44 вуз ( $\varphi = 20^\circ$ ) до 0,26 вуз ( $\varphi = 90^\circ$ .)

При вітру 34 вузли (20 м/с) швидкість течії становить 1,25 вуз., а з рис. 2.1 зрозуміло, що швидкість течії змінюється від 0,88 вузлів ( $\varphi = 20^\circ$ ) до 0,52 вуз. ( $\varphi = 90^\circ$ ).

Як зрозуміло, вже при швидкості вітру 10 м/с різниця швидкості вітрової течії, розрахованої за формулою (2.4), та графіком (N-1) керівництва [11], становить від 0,26 до 0,44 вуз. При проведенні тривалих морських пошукових операцій використання методики, яка наведена в [12], підвищує точність розрахунку найбільш ймовірного місця розташування пошукового об'єкта. Однак в методиках 12 при розрахунку не використовуються величини розгону та тривалість дії вітру.

У роботі [9] розрахунок вітрової дрейфу здійснюється за номограмою, вхідними параметрами якої є швидкість, розгін та тривалість дії вітру. При відсутності даних про напрямок та силу вітру використовується номограма, наведена в роботі [9]. При цьому використовуються градієнти атмосферного тиску для розрахунку швидкості вітру у відкритому океані, а потім за швидкістю вітру – швидкість течії. Напрямок течії збігається з дотичною, яка проведена до ізобари в даній точці, якщо дивитися в напрямку потоку, праворуч повинен бути високий тиск, ліворуч – низький. Оскільки швидкість вітрової течії пов'язана з крутизною та висотою хвилі, то повноцінний розвиток хвилювання та вітрової течії досягається практично одночасно.

Разом з впливом вітру у відкритому морі на динамічний морський об'єкт має вплив усталене хвилювання, створюючи додаткову хвильову течію. У роботі [9] наведено формулу для розрахунку швидкості хвильової течії (см/с):

$$V_{\text{волт.т}} = \left( (0,5h)^2 \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \right), \quad (15)$$

де  $h$ ,  $\lambda$  – висота та довжина хвилі відповідно;

$g$  – прискорення сили тяжіння.

Детальний алгоритм розрахунку величини та напрямку приливної течії наведено у багатьох посібниках.

Проведений аналіз свідчить, що виникає необхідність уточнення методики розрахунку складових швидкості переміщення динамічного об'єкта в морі під дією зовнішніх впливів. На теперішній час для цієї мети можуть бути використані поточні вимірювання елементів обстановки, на основі яких комп'ютерні технології дозволяють значно спростити та уточнити розрахунки у порівнянні з графіками та номограмами. Це дозволить скоротити час пошуку та збільшити ймовірність знаходження об'єкта пошуку.

При вирішенні завдань пошуку об'єкта на морі для прийняття рішення, відповідно до вимог посібника IAMSAR, необхідно встановити передбачуване місце розташування пошукового об'єкта для проведення пошукових операцій. Під впливом зовнішніх факторів об'єкт пошуку буде перемішуватися. Існує кілька методів розрахунку координат місця повільно дрейфуючого об'єкта з урахуванням впливу зовнішніх факторів – вітру, течії.

Актуальність даного питання обумовлена складністю пошуково-рятувальних операцій при пошуку невеликих об'єктів в морі.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що у спільних діях на об'єкт вітру, хвилювання та течії практично неможливо оцінити окремі елементи зносу та дрейфу, а відповідно і застосувати існуючі методи розрахунків у припущенні дії тільки одного з зовнішніх факторів. Отже доцільно оцінити сумарні елементи зносу об'єкта у формулах (11) за поточними рядами траєкторії вимірювань [1, 2].

Перший підхід цих оцінок здійснюється за рахунок приростів числових координат за попередніми згладженими вимірами курсу та швидкості руху об'єкта та приростами безпосередньо виміряних (обсервованих) координат в наступному вигляді [1, 2]:

$$\operatorname{tg} \hat{K}_c = \frac{\sum_1^n [(\Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i t_i \sin \hat{K}_i)(\Delta \varphi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos \hat{K}_i)]}{\sum_1^n (\Delta \varphi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos \hat{K}_i)^2}; \quad (16)$$

$$\hat{V}_c = \frac{\sum_1^n (\Delta \lambda_{oi} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i t_i \sin \hat{K}_i)^2 + [(\Delta \varphi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos \hat{K}_i)^2]^{0.5}}{\sum_1^n t_i^2}, \quad (17)$$

де  $\hat{K}_c$ ,  $\hat{V}_c$  – оцінки значень курсу та швидкості сумарного зносу об'єкта при русі за локсодромією (при постійних курсах).

При розрахунках за формулами (16), (17) одночасно відбувається фільтрація випадкової похибки ряду траєкторних вимірювань на основі згладжування проміжних обчислень та кінцевих результатів.

Інший підхід оцінки елементів сумарного зносу випливає з рівності формул (6) та (11) й можливості визначення елементів вектора сумарного зносу через оцінки швидкості відносно ґрунту за обсерваціями, згладжених вимірювань або прогнозу курсу та швидкості об'єкта (5), (10):

$$\left. \begin{aligned} \hat{V}_{\varphi i} - \hat{V}_i \cos \hat{K}_i &= \hat{V}_{ci} \cos \hat{K}_{ci}; \\ \hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i \sin \hat{K}_i &= \hat{V}_{ci} \sin \hat{K}_{ci}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Ділення другого виразу формули (18) на перший дає оцінку курсу, а квадрат обох виразів (18) та їх додавання з урахуванням формули (8) дає оцінку швидкості поточних значень сумарного зносу об'єкта:

$$\operatorname{tg} \hat{K}_{ci} = \frac{(\hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i - \hat{V}_i \sin \hat{K}_i)}{(\hat{V}_{\varphi i} - \hat{V}_i \cos \hat{K}_i)}; \quad (19)$$

$$\hat{V}_{ci} = [\hat{V}_{gi}^2 + \hat{V}_i^2 - 2\hat{V}_i(\hat{V}_{\varphi i} \cos \hat{K}_i + \hat{V}_{\lambda i} \cos \hat{\varphi}_i \sin \hat{K}_i)]^{0.5}. \quad (20)$$

Оцінку значень вектору зносу за формулами (16), (17), (19), (20) на основі попереднього аналізу, навіть при наявності гіпотези про постійну дію зовнішніх факторів (течія, вітер, хвилювання), необхідно виробляти у вигляді ковзаного вікна з інтервалами, при яких елементи руху об'єкта підтримуються постійними. Це пов'язано з тим, що дрейф об'єкта від впливу вітру – це вхідний компонент, який є частиною сумарного зносу об'єкта, буде різним при зміні курсу та швидкості руху об'єкта [7, 13].

З метою якісного функціонування кінематичних моделей руху об'єкта на морі (1) –

(11) необхідно використовувати методи згладжування та фільтрації вимірювань для компенсації похибки в оцінках параметрів траєкторії та їх швидкості зміни [1, 3, 13].

В якості вихідних значень для прогнозування можуть використовуватися попередні виміряні або згладжені параметри для компенсації похибок. З аналізу дослідження [1, 3] виявлено, що найкраще згладжування параметрів ряду траєкторних даних досягається рекурентним експоненційним фільтром або модернізованим фільтром Хемінга з адаптацією їх коефіцієнтів вимірювання:

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i-1} + \alpha(x_i - \hat{x}_{i-1}); \quad (21)$$

$$\hat{x}_i = \frac{p_1}{t_{i-1}} \hat{x}_{i-1} + x_i + \frac{p_{+1}}{t_{i+1}} x_{i+1}, \quad (22)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт згладжування, адаптований за вимірюванням;

$p_{-1}, p_{+1}$  – компоненти вагових коефіцієнтів вимірювань, які адаптуються до вимірювань методом найменших квадратів;

$t_{i-1}, t_{i+1}$  – змінні інтервали вимірювання (час або відстань) відносно згладженого вимірювання в трьох точковому інтервалі згладжування.

Адаптовані коефіцієнти згладжування фільтрів (21), (22) постійно коригуються до поточних вимірювань параметрів на основі методу найменших квадратів, значення яких після перетворень представлені у такому кінцевому вигляді:

$$\alpha = \frac{(\sum_1^n (\hat{x}_1 - \hat{x}_{i-1})(x_1 - \hat{x}_{i-1}))}{(\sum_1^n (x_1 - \hat{x}_{i-1})^2)}; \quad (23)$$

$$p_{-1} = \frac{(\sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i-1}}{t_{i-1}} \sum_1^n \frac{(x_{i+1})^2}{t_{i+1}} - \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i+1}}{t_{i+1}} \sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}})}{\Delta}; \quad (24)$$

$$p_{+1} = \frac{(\sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i+1}}{t_{i+1}} \sum_1^n \frac{(x_{i-1})^2}{t_{i-1}} - \sum_1^n \frac{(x_i - \hat{x}_i)x_{i-1}}{t_{i-1}} \sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}})}{\Delta};$$

$$\Delta = \sum_1^n \left(\frac{x_{i-1}}{t_{i-1}}\right)^2 \sum_1^n \left(\frac{x_{i+1}}{t_{i+1}}\right)^2 - \left(\sum_1^n \frac{x_{i-1}x_{i+1}}{t_{i-1}t_{i+1}}\right)^2.$$

За формулою (1), (21)-(24) згладжується та прогнозується значення кожного траєкторного параметру незалежно від інших параметрів, з урахуванням оцінок значень їх швидкостей за попередніми вимірами.

Дослідженнями часових рядів траєкторних вимірювань руху судна встановлено, що найкращий прогноз забезпечується зі швидкостями параметрів, отриманий п'ятикратковою процедурою, побудованою за трьома вимірами.

Мінімально можливий інтервал вимірювання дозволяє відслідковувати поточну швидкість зміни навігаційного параметра. У трьох вимірах пропонується обчислити проміжні швидкості параметра між сусідніми інтервалами вимірювання, розмістивши їх в порядку близькості до розрахункового параметра для створення п'ятикраткової процедури.

$$\hat{v}_i = \frac{2(x_{i+1} - x_{i-1})}{3(T_{i+1} - T_{i-1})} \left( \frac{(x_i - x_{i-1})}{(T_i - T_{i-1})} + \frac{(x_{i+1} - x_i)}{(T_{i+1} - T_i)} \right) / 12. \quad (25)$$



Недолік методів фільтрації (3.1)-(3.5) для прогнозування полягає в тому, що оцінки параметрів отримуються не на поточному, а на попередньому моменті вимірювань.

Фільтрація та оцінювання елементів руху морського динамічного об'єкта необхідні для згладжування вимірювань траєкторних параметрів, супроводження та прогнозування їх подальшого положення об'єкта. Існують різні методи та підходи до фільтрації та оцінювання параметрів руху різної за природою та призначенням об'єктів, в залежності від характеру вихідних даних та інших умов для рішення задач супроводження.

При цьому зазначається, що найбільш зручними та простими для використання у кінематичних моделях алгоритмами лінійної фільтрації є так звані  $\alpha$ ,  $\beta$ -фільтри (при постійних коефіцієнтах) або фільтри Калмана другого порядку (при адаптації коефіцієнтів). Ці фільтри розв'язують задачу згладжування, прогнозування та оцінки швидкості зміни будь-якого супроводження параметра, які представлені у загальному рівнянні:

$$\begin{aligned} \hat{X}_i &= \tilde{X}_i + \alpha(X_i - \tilde{X}_i); \\ \hat{V}_i &= \hat{V}_{i+1} + \frac{\beta(X_i - \tilde{X}_i)}{t_i}; \\ \hat{X}_i &= \hat{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i, \end{aligned} \quad (26)$$

де  $X_i$  – поточне виміряне значення параметра;

$\alpha$  та  $\beta$  – коефіцієнти згладжування, що відповідають коефіцієнтам підсилення нев'язки вимірювання та прогнозування.

Останнє рівняння у фільтрі (26) відповідає кінематичній моделі руху першого порядку (1).

У перших двох рівняннях (26) у явному вигляді присутнє відхилення прогнозованих виміряних значення параметра.

Методичною перевагою фільтра  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтра (26) над методами обробки часових рядів (21)-(25) є те, що фільтр  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтр одночасно згладжує вимірювання, оцінює параметр та швидкість його зміни. Коефіцієнти  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтра змінюються в процесі супроводження цілі в залежності від номера такту вимірювання та представлені залежностями:

$$\alpha = \frac{2(2i - 1)}{i(i + 1)}; \beta = \frac{6}{i(i + 1)}; \quad (27)$$

$$\alpha = \frac{2(2i + 1)}{i(i + 1)(i + 2)}; \beta = \frac{6}{(i + 1)(i + 2)}; \quad (28)$$

$$\alpha = \frac{6(i + 1)}{(i + 2)(i + 3)}; \beta = \frac{12}{(i + 2)(i + 3)}, \quad (29)$$

де  $i$  – номер такта вимірювання.

При цьому встановлено, що зі збільшенням кількості тактів вимірювань коефіцієнти  $\alpha$ ,  $\beta$ , зменшуються, забезпечуючи повне усереднення (згладжування) виміряних значень параметру.

Як правило, у процесі супроводження коефіцієнти  $\alpha$  та  $\beta$  визначаються за 2-3 значеннями на початковій ділянці, від 3-6 – на середній ділянці та при встановленому стані – по 10-15 [14].

Для налагоджених процесів супроводження, орієнтованих на суднові системи автоматичної радіолокаційної прокладки (САПР), для визначення значень  $\beta$  коефіцієнтів рекомендується формула (3.9).

Коефіцієнти при згладжуванні супутньої дистанції до об'єкту значення коефіцієнтів приймаються з таких умов:

$$\begin{aligned} \alpha = 20/D; \beta = 4/D; \text{ при } D > 20 \text{ км, тобто } 0,2 \leq \alpha \leq 0,5; 0,01 \leq \beta \leq 0,2 \\ \alpha = 0,5; \beta = 0,2; \text{ при } D < 20 \text{ км,} \end{aligned} \quad (30)$$

де  $D$  – дистанція до цілі.

На основі попередніх досліджень [29, 30] пропонується новий метод адаптації значень коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$  на основі поточних вимірювань та згладжування будь-якого параметра замість розрахунків за формулами (3.7)-(3.10). Для цього після підстановки прогнозованого значення від третього рівняння системи (26) в перше та друге рівняння отримують формули, що характеризують відхилення оцінених значень від вимірювань.

Після возведення цих виразів в квадрат додавання за всіма згладженими значеннями ( $n$ ) отримують критерії мінімуму суми квадратів відхилень згладжених і виміряних значень параметрів для визначення  $\alpha$ ,  $\beta$ -коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} Q_x &= \sum [\bar{X}_{i-1} + \bar{V}_i t + \alpha(X_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t_i) - \bar{X}_i]^2 = \min; \\ Q_v &= \sum [\bar{V}_{i-1} + \beta(X_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t_i)/t_i - \bar{V}_i]^2 = \min, \end{aligned} \quad (31)$$

де  $Q_x$ ,  $Q_v$  – критерії мінімуму суми квадратів відхилень згладжених та виміряних значень параметру та швидкості його зміни.

Для мінімізації відхилень за критерієм (31) для сукупності вимірювань достатньо обчислити перші похідні від виразів (31)  $\alpha$ ,  $\beta$ -коефіцієнти, які задовольняють вимогам мінімуму найменших квадратів відхилень:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_x}{\partial \alpha} &= 0; \\ \frac{\partial Q_v}{\partial \beta} &= 0. \end{aligned} \quad (32)$$

Після обчислення похідних (32) за шуканими коефіцієнтами  $\alpha$  та  $\beta$  від правих частин виразів (31) та подальших перетворень отримуються вирази для адаптації коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$  за поточними результатами вимірювання з конкретними статистичними властивостями для згладжування кожного супутнього параметра:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\sum [(\bar{X}_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t)(X_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t_i)]}{\sum (X_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t_i)^2}; \\ \beta &= \frac{\sum [(\bar{V}_i - \bar{V}_{i-1})(X_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t_i)/t]}{\sum [(X_i - \bar{X}_{i-1} - \bar{V}_i t_i)/t_i]^2}. \end{aligned} \quad (33)$$

Розрахунки (33) пропонується проводити за значенням вимірювання та згладжування параметра ковзаним вікном, в яких кількість тактів вимірювань узгоджується з рекомендаціями щодо використання виразів (27)-(30) або на основі конкретних

статистичних даних вимірювань та режиму руху (маневрування) об'єкта.

Результати моделювання роздільного згладжування, оцінки та прогнозування траєкторних параметрів руху об'єкта наведені на рисунках 2-8.

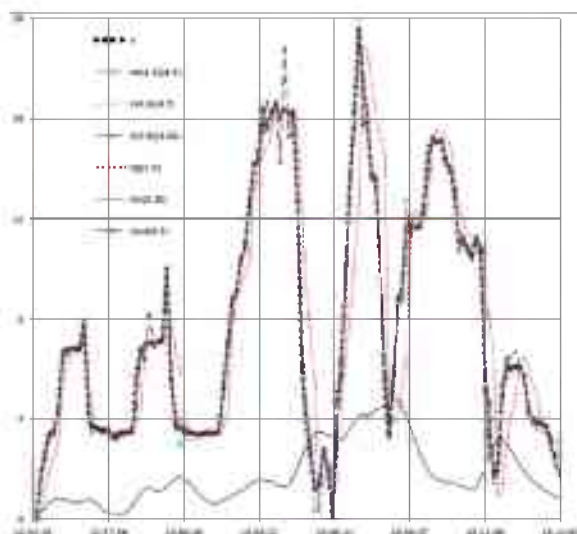


Рисунок 2 – Згладжування та прогнозування швидкості об'єкта

На рис. 2 наведено:  $V$  – вимірювання;  $V_e$  (21) (23) – експоненційне згладжування;  $V$  (26) (27) – згладжування  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром (26), (27);  $V$  (26) (33) – згладжування  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром (26), (33);  $V_g$  (28) – швидкість відносно ґрунту (8);  $V_{ci}$  (20) – швидкість сумарного зносу (20);  $V_{ci}$  (5) – прогнозування швидкості на 4 такти вперед (5).

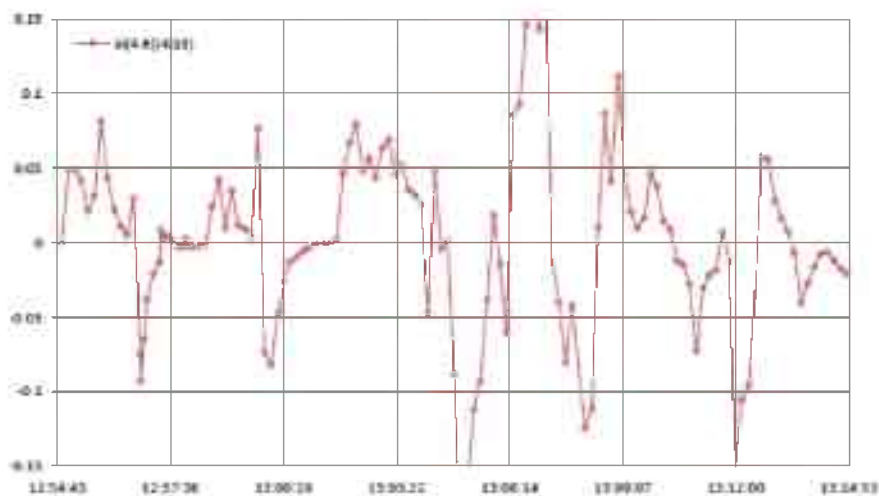


Рисунок 3 – Оцінки лінійного прискорення руху об'єкта  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром

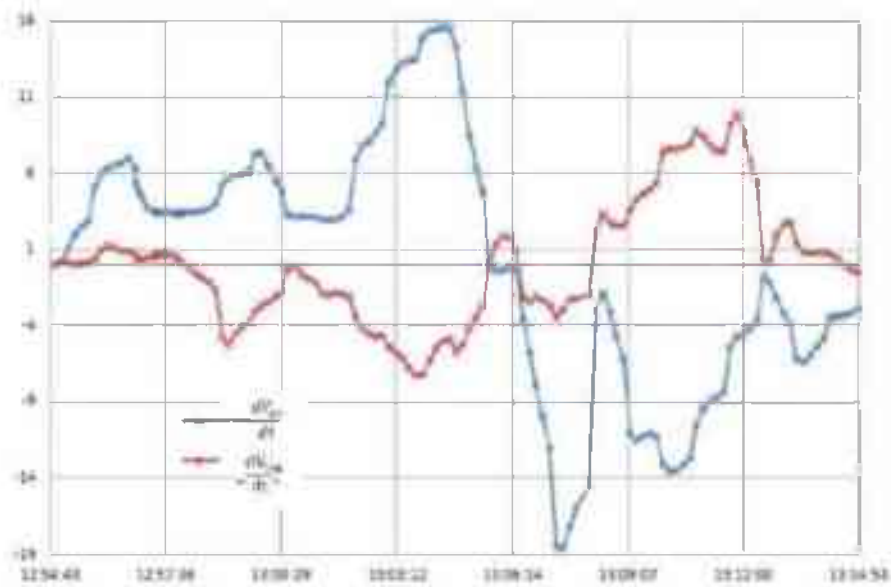


Рисунок 4 – Оцінки швидкостей широти та довготи при переміщеннях об'єкта  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром;

$\frac{dV_{\varphi t}}{dt}, \frac{dV_{\lambda t}}{dt}$  – оцінки швидкості зміни широти та довготи відповідно

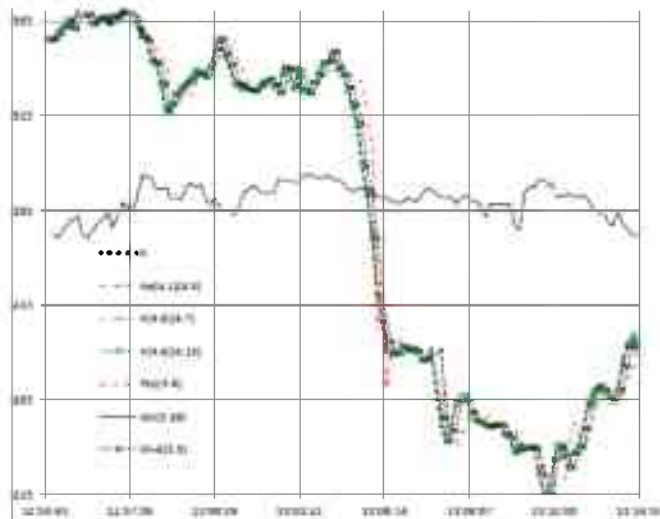


Рисунок 5 – Згладжування та прогнозування курсу об'єкта

На рис. 5 позначено:  $K$  – вимірювання;  $K_e$  (21) (23) – експоненційне згладжування;  $K$  (26) (27) згладжування  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром (26), (27);  $K$  (26) (33) – згладжування  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром (26), (33);  $PU_i$  (28) – шляховий кут (8);  $K_{si}$  (19) – курс сумарного зносу;  $K_{i-4}$  (5) – прогнозування на 4 такту вперед (5).

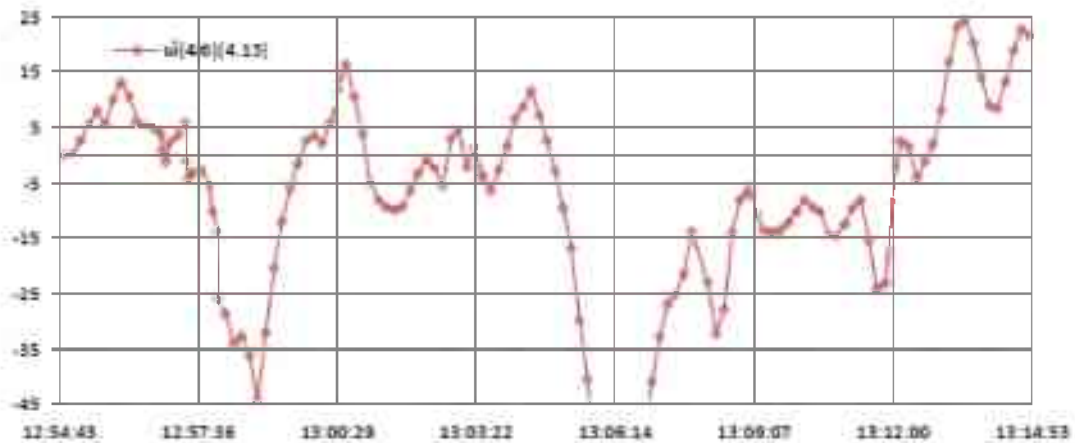


Рисунок 6 – Оцінки швидкості кутового повороту об'єкта  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром

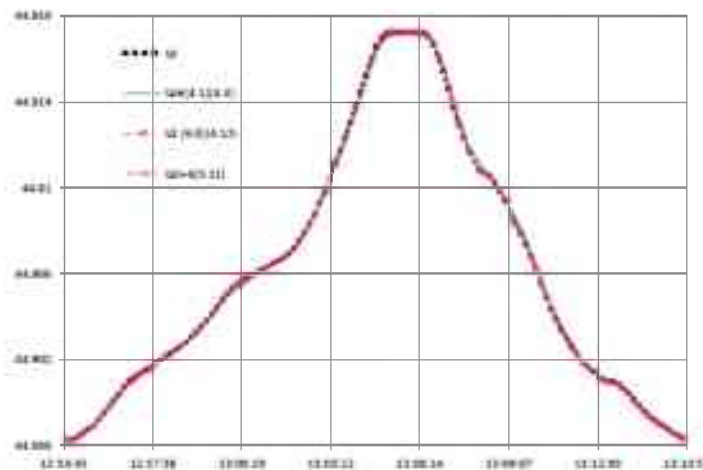


Рисунок 7 – Згладжування та прогнозування довготи при переміщеннях об'єкта

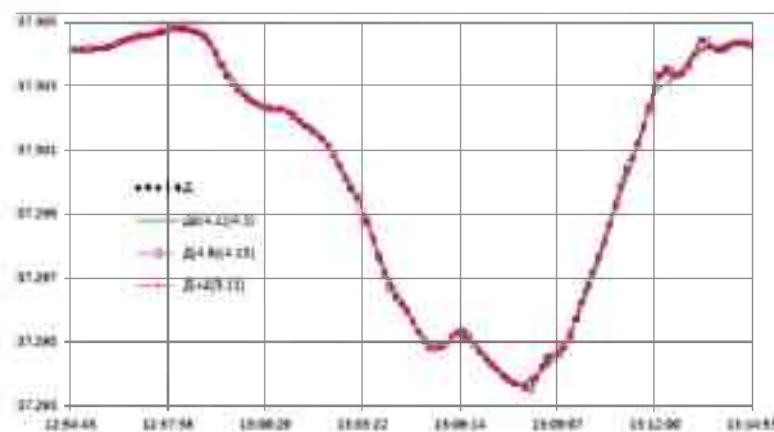


Рисунок 8 – Результати згладжування та прогнозування довготи при переміщенні об'єкта

Згідно з представленими графіками, за результатами моделювання та експериментів слідують важливі теоретичні та практичні висновки з урахуванням попереднього аналізу та досліджень [4, 5]:

1. Серед запропонованих методів згладжування та оцінювання всіх траєкторних параметрів (21)-(33) найкращі загладжувані властивості має  $\alpha$ - $\beta$ -фільтр (26) з переміщувальним вікном п'яти вимірів. Для деяких параметрів траєкторії (курсу та

швидкості) еквівалентні властивостям згладжування мають експоненційний фільтр (21), (23). Але слід мати на увазі, що  $\alpha$ - $\beta$ -фільтр (26) забезпечує додаткову оцінку швидкості змін всіх параметрів траєкторії та елементів сумарного зносу об'єкта від зовнішніх впливів.

2. Моделюванням та експериментами встановлено, що фільтр  $\alpha$ - $\beta$  (26) показує найкращі якості з виразами рекомендованих  $\alpha$ - $\beta$  коефіцієнтів (27) (зі значеннями в межах  $\alpha = 0,6 \div 1$ ;  $\beta = 0,2 \div 0,9$ ) в порівнянні з іншими (28)-(30) на для усіх етапів та режимів супроводження розглянутих параметрів.

3. Найкраще згладжування  $\alpha$ - $\beta$ -фільтр (26) показує з адаптивними коефіцієнтами  $\alpha$  та  $\beta$  (33), отриманими вперше, які пристосовуються до статистичних властивостей конкретних вимірювань конкретного параметра. У процесі адаптації коефіцієнти змінювалися в межах  $\alpha = 0,7 \div 1$ ;  $\beta = 0,3 \div 1,3$ . При цьому прогнозовані значення параметрів на чотири такта вперед практично співпадають з їх вимірювальними або згладжувальними у всьому діапазоні значень (середні квадратичні відхилення (СКО) зі швидкістю 0,3 вузла, курсу -  $1,0^2$ , що значно краще обробки методами часових рядів [4]). Прогнозовані значення параметрів  $\alpha$ - $\beta$ -фільтром (26) (33) в межах такту співпадають з їх вимірюваннями.

4. Найбільші відхилення прогнозованих траєкторних параметрів (при чому всіх) при обробці методів часових рядів спостерігаються при значеннях швидкістю руху об'єкта близьких до нуля при його маневруванні, що можна пояснити нестабільною зміною параметрів руху. Застосування  $\alpha$ - $\beta$ -фільтра (26), (34) усуває ці недоліки для всіх режимів руху об'єкта.

5. Оцінки швидкості зміни параметрів (лінійне прискорення, кутова швидкість)  $\alpha$ - $\beta$ -фільтра (26), (33) мають стабільні значення та забезпечують добрий прогноз. Інтервал прогнозування та оцінка швидкостей зміни параметрів руху слід узгоджувати з наявністю очікуваних маневрів об'єкта і враховувати його маневрені якості.

6. Зміна складових загального вектора сумарного зносу пов'язана з реальною зміною впливу вітру та течії по відношенню до маневрів об'єкта, в тому числі похибками їх оцінки (8), (19), (20). Ця зміна дає добрі результати прогнозування за усім діапазоні їх значень при маневрі об'єкта.

7. Прогнозування траєкторії руху об'єкта на основі комплексної моделі (5), (11), (19), (20), (26), (33) дає найкращі значення широти та довготи в будь-яких режимах маневрування (СКО за широтою та довготою - 0,03). Великі відхилення прогнозу за довготою в діапазоні часу 13:06:14 - 13:14:53, можливо, пов'язані з похибками вимірювання та, відповідно, оцінкою всіх параметрів. Значення  $\alpha$ - $\beta$ -коефіцієнтів адаптації (33) змінюються від 0,2 до 1,5.

**Висновки.** У ході дослідження систематизовано проблеми, здійснено класифікацію методів пошуку та супроводження об'єктів на морі, які дозволяють виділити часткові та загальні підходи вирішення пошукових завдань у різних умовах з метою формалізації моделей пошукових процесів і процесів. Проведено дослідження методів пошуку, введено поняття пошукової одиниці, проведено теоретично-множинне обґрунтування районів та умов пошуку. Розроблено технологію фільтрації та оцінювання кінематичних елементів руху та супроводження об'єкта, на підставі  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтра. Сформовано алгоритми адаптації коефіцієнтів  $\alpha$  та  $\beta$ -фільтра за поточними вимірюваннями параметрів.

### Література

1. Васьков, А.С. Весовое сглаживание навигационных данных с переменными интервалами измерений [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Интернет- журнал «Науковедение». – 2014. - Вып.4(23). – Идентификационный №60TVN414
2. Васьков, А.С. Оценка сноса судна по траекторным измерениям [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Эксплуатация морского транспорта.– 2015.– №2(75).– С.34 – 38.

3. Васьков, А.С. Кусочно-линейное сглаживание траекторных данных движения судна [Текст]/ А.С.Васьков, В.Г.Мельник// Эксплуатация морского транспорта.– 2015.– № 1 (74).– С. 28 – 32.
4. Васьков, А.С. Прогнозирование и контроль движения судна [Текст]/ А.С.Васьков, А.А.Грищенко// Морские интеллектуальные технологии. – 2019. –№1 (43).- Т.2. –С.92 –97.
5. Васьков, А.С. Сопровождение параметров траектории движения судна [Текст]/ А.С.Васьков, А.А.Грищенко// Морские интеллектуальные технологии. – 2019. –№ 4 (46).- Т.3. – С.77 –82.
6. Артющенко, В.М. Кинематические и вероятностные характеристики процесса поиска и обнаружения движущегося объекта [Текст]/ В.М.Артющенко, В.И.Воловач// Журнал радиоэлектроники [электронный журнал].– 2017.– №3.– С.1–25.
7. Баранов, Ю.К. Навигация [Текст]/ Ю.К.Баранов, М.И.Гаврюк,В.А.Логиновский, Ю.А.Песков.- СПб.: Лань, 1997.- 449 с.
8. Абросимов, В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде [Текст]. – М.: Наука, 2013. – 168 с.
9. Абузьяров, З.К. Оперативное океанографическое обслуживание [Текст]/ З.К.Абузьяров, И.О.Думанская, Е.С.Нестеров.- Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009.-288 с.
10. Бовченко, П.Г. Краткий курс метеорологии и океанографии для судоводителей[Текст]/ П.Г.Бовченко, А.Е.Зубков.- М.: Морской транспорт, 1960.- С.326 – 331.
11. Биденко, С.И. Геопространственная формализация системы морской транспортной активности [Текст]/С.И.Биденко, Е.Л.Бородин, Н.Е.Сердитова, С.В.Травин// Межвуз. Сб. научн. Тр.: Информационные технологии и системы.- СПб., 2017.- Вып. 2(20).- С.84-94.
12. Биденко, С.И. Человеческий фактор в интеллектуальных системах [Текст]/ С.И.Биденко, А.И.Яшин// Биотехносфера.- 2010.- № 2(8).- С.45-48.
13. Васьков, А.С. Методологические основы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности [Текст]: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. (05.22.16). – СПб.: ГМА им.адм. С.О.Макарова, 1998.– 48 с.
14. Верба, В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Состояние и тенденции развития [Текст].– М.: Радиотехника.

**Hannoshyna I., Kalinichenko T., Nikitin P.**

### **RESEARCH OF METHODS OF FORECASTING THE MOVEMENT, SEARCH AND MONITORING OF SEA OBJECTS**

*In the course of the research, the problems were systematized, the classification of methods of search and tracking of objects at sea was carried out, which allow to distinguish partial and general approaches to solving search tasks in different conditions with the aim of formalizing models of search processes and processes. A study of search methods was carried out, the concept of a search unit was introduced, and a theoretical and multiple justification of areas and search conditions was carried out. The expediency is substantiated and the technology of multiple analysis of the formation of the navigation situation, areas and conditions of search operations as a universal mathematical apparatus for planning search actions and tracking search objects is substantiated. The principles of probabilistic assessment of search processes have been developed. Theoretical research and computer modeling of the methods of searching for and tracking marine dynamic objects have established the most suitable separate by parameters and combined models for tracking and forecasting the movement of the search object with an assessment of drift and current actions. The expediency has been substantiated and the algorithms for smoothing and*

*evaluation of kinematic elements of the object's movement accompanied by time series of measurements using an exponential filter in three dimensions with adaptation according to current measurements have been tested. The technology of filtering and evaluation of kinematic elements of movement and tracking of the object has been developed, based on the  $\alpha$  and  $\beta$ -filter, and the algorithms for adapting the coefficients of the  $\alpha$  and  $\beta$ -filter based on current parameter measurements have been developed.*

**Keywords:** methods, forecasting, search, monitoring, marine dynamic objects.