

УДК 621.391.1:681.883.3

І.Ю. Целіщев

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

## ПІДХІД ДО ОЦІНЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ РУХОМИХ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ, ВИЯВЛЕНИХ ЗА ЇХ СУПУТНИМИ СЛІДАМИ, З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ВІД ВИДОВИХ ЗАСОБІВ ПОВІТРЯНОЇ РОЗВІДКИ

*В статті розглянуто підхід до оцінювання точності вимірювань параметрів руху морських об'єктів, виявлених за зображеннями їх супутних слідів, на основі аналізу функції невизначеності алгоритму частково-когерентної обробки зображень збуреної морської поверхні. Проаналізовано вплив на точність вимірювань похибок оцінювання навігаційних параметрів літака-носія розвідувального обладнання та похибок алгоритму вимірювань.*

**Ключові слова:** рухомі морські об'єкти, похибка вимірювання параметрів об'єктів, супутні сліди, оптимальна обробка зображень, курсовий кут, швидкість руху, навігаційні параметри, визначення координат.

### Вступ

Однією з невід'ємних складових процесу отримання розвідувальної інформації за даними видової повітряної розвідки є обробка зображень, яка, в свою чергу, включає виявлення та розпізнавання об'єктів, а також, виконання вимірювань їх параметрів [1].

Основний вплив на точність оцінювання параметрів об'єктів зумовлений наявністю фізичних джерел похибок, а також похибками вимірювання та спостереження [1].

Фізичні похибки визначаються такими факторами, як дисторсійні та атмосферні викривлення, кривизна Землі, швидкісний зсув зображення, тощо. Похибки вимірювання та спостереження визначаються психофізичними особливостями оператора-дешифрувальника та точнісними характеристиками засобів дешифрування та вимірювання, а при автоматичній обробці зображень - точнісними характеристиками алгоритму вимірювань. Також при вимірюванні координат та параметрів руху об'єктів має місце вплив точнісних характеристик датчиків навігаційної інформації літака-розвідника.

Існує велика кількість методів усунення та компенсації фізичних похибок різного походження. Тому основними джерелами похибок при автоматизованій обробці аерозображень залишаються неточності вимірювань та навігаційної системи літака-розвідника.

**Метою статті** є висвітлення підходу до оцінювання точності вимірювань параметрів рухомих морських об'єктів (РМО), виявлених за їх супутними слідами з використанням інформації від видових засобів повітряної розвідки, з урахуванням похибок алгоритму вимірювань та похибок вимірювань навігаційних параметрів польоту.

### Основна частина

Сумарна похибка  $\Delta\Lambda$  вимірювання параметрів об'єктів буде складатись з двох компонентів, а саме:

$$\Delta\Lambda = \Delta\Lambda_A + \Delta\Lambda_H, \quad (1)$$

де  $\Delta\Lambda_A$  – похибка алгоритму вимірювань,  $\Delta\Lambda_H$  – похибка визначення навігаційних параметрів.

У роботі [2] запропоновано алгоритм оптимальної за критерієм максимуму функції вірогідності частково-когерентної обробки зображень, а також наведено варіант побудованої на його основі адаптивної системи багатоальтернативного виявлення та оцінювання (вимірювання) параметрів руху (швидкості, курсового кута) та орієнтовних координат РМО за зображеннями їх супутних слідів на фоні збуреної морської поверхні в просторовій (рис. 1 а, б) та просторово-частотній областях (рис. 1 в, г).

Вихідний ефект багатоканальної адаптивної системи, за результатом порогової обробки якого приймається рішення про наявність РМО та значення його параметрів, описується таким математичним виразом:

$$W(\vec{\lambda}) = -\mu(\vec{\lambda}) + Q(\vec{\lambda}), \quad (2)$$

де  $\vec{\lambda}$  – вектор параметрів сигналу супутнього сліду (курсний кут руху, швидкість РМО);  $Q(\vec{\lambda})$  – результат узгодженої обробки вхідного коливання  $u(x, y)$ , що представляє собою суму сигналу  $s(x, y, \vec{\lambda})$  та завади  $n(x, y)$ ;  $\mu(\vec{\lambda})$  – сумарне енергетичне відношення сигнал-завада (BCЗ).

Складові  $Q(\vec{\lambda})$  та  $\mu(\vec{\lambda})$  для частково-когерентної обробки представляються, як [3]:

$$Q(\vec{\lambda}) = \sum_{r=1}^R \frac{|\dot{Q}_r(\vec{\lambda}_r)|^2}{\mu_r(\vec{\lambda}_r) + 1}, \quad (3)$$

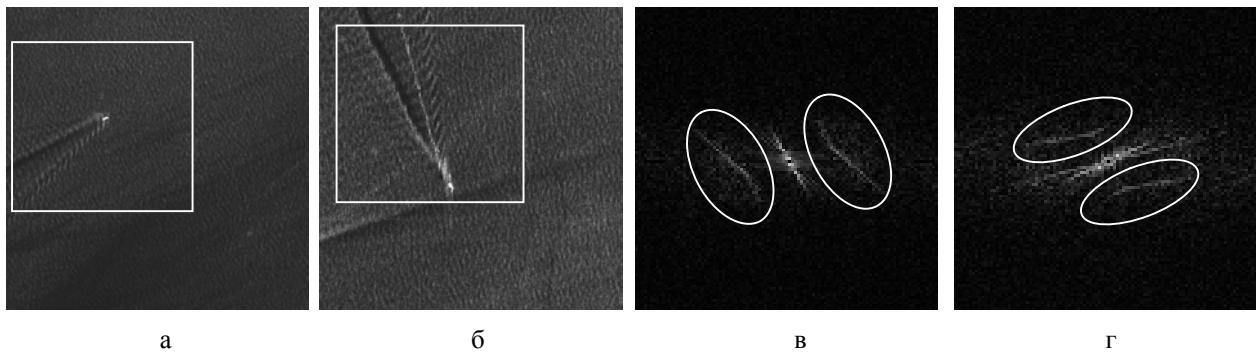


Рис. 1. Области зображень супутних слідів (а, б) РМО на фоні збуреної морської поверхні при різних параметрах їх руху, а також їх відповідних просторових спектрів (в, г)

$$\mu(\vec{\lambda}) = \sum_{\gamma=1}^R \mu_{\gamma}(\vec{\lambda}_{\gamma}), \quad (4)$$

де  $\dot{Q}_{\gamma}(\vec{\lambda}_{\gamma})$  та  $\mu_{\gamma}(\vec{\lambda}_{\gamma})$  – відповідно комплексний кореляційний інтеграл та енергетичне ВСЗ для кожної  $\gamma$ -ї складової (пласкої хвилі) некогерентного сигналу. Під сигналом в даному випадку розуміємо зображення супутнього сліду, а під завадою – зображення збуреної морської поверхні. У просторово-частотній області за умов дії некорельованій, або слабо-корельованій гаусівської перешкоди

$$\dot{Q}_{\gamma}(\vec{\lambda}_{\gamma}) = \frac{1}{\sigma_0^2} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \dot{U}(u, v) S_{\gamma}^*(u, v, \vec{\lambda}) du dv, \quad (5)$$

$$\mu_{\gamma}(\vec{\lambda}_{\gamma}) = \frac{1}{2\sigma_0^2} \int \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\gamma}^2(u, v, \vec{\lambda}_{\gamma}) du dv. \quad (6)$$

де  $u, v$  – координати в просторово-частотній області;  $\dot{U}(u, v)$  та  $S_{\gamma}(u, v, \vec{\lambda})$  – відповідно просторово-частотні спектри вхідного коливання та  $\gamma$ -ї складової сигналу.

Відповідно до запропонованої методики алгоритм оптимальної обробки включає такі етапи [2]: розбиття поля зображення на квадратні вікна, розмір яких порівнянний з розмірами супутнього сліду, та які перекриваються навіпіл; здійснення двомірного швидкого перетворення Фур'є в кожному з таких вікон; здійснення узгодженої обробки розрахованих просторово-частотних спектрів у відповідності до виразів (5, 6) для кожного з каналів, сформованих за множиною значень вектору параметрів  $\vec{\lambda}$ ; некогерентне спектральне накопичення результатів обробки для кожного вікна у відповідності до виразів (3, 4).

Похибка алгоритму оптимальної частково-когерентної обробки по кожному з параметрів вектора  $\vec{\lambda}$  залежить від розрізняювальної здатності алгоритму, яка, в свою чергу, може бути визначена як ширина функції невизначеності  $\Delta P$  системи обробки на рівні 0,64:

$$\Delta \Lambda_A = \Delta P_{0,64}.$$

Під функцією невизначеності в даному випадку розуміється залежність вихідного ефекту системи,

налаштованої на приймання сигналу з певними значеннями вектору параметрів  $\vec{\lambda}$  при прийманні сигналів з іншими значеннями вектору параметрів  $\vec{\lambda}'$  [4], яка для алгоритму частково-когерентної обробки з урахуванням виразів (3 – 6) приймає вигляд:

$$P(\vec{\lambda}, \vec{\lambda}') = \sum_u \sum_v \left[ -\frac{1}{2} |S(u, v, \vec{\lambda})|^2 + |S(u, v, \vec{\lambda}')| |S(u, v, \vec{\lambda})| \right]. \quad (7)$$

Якщо представити вектор  $\vec{\lambda}$  у вигляді:

$$\vec{\lambda} = (\theta_0, V_0),$$

де  $\theta_0$  – курсовий кут руху РМО,  $V_0$  – швидкість руху РМО, то функція невизначеності по курсовому куту прийме вигляд:

$$P(\theta_0, \theta_0') = \sum_u \sum_v \left[ -\frac{1}{2} |S(u, v, \theta_0, V_0)|^2 + |S(u, v, \theta_0', V_0)| |S(u, v, \theta_0, V_0)| \right], \quad (8)$$

а функція невизначеності по швидкості, відповідно:

$$P(V_0, V_0') = \sum_u \sum_v \left[ -\frac{1}{2} |S(u, v, \theta_0, V_0)|^2 + |S(u, v, \theta_0, V_0')| |S(u, v, \theta_0, V_0)| \right], \quad (9)$$

де  $\theta_0'$  та  $V_0'$  – значення курсового кута та швидкості руху на вході системи.

Розрахунки функції невизначеності за виразами (8, 9) з використанням моделі сигналу та його спектру, наведеної в [2], показали, що величина параметра  $\Delta P_{0,64}$ , в залежності від параметрів та умов руху, складатиме від 10 до 20° за курсовим кутом та одиниці м/с за швидкістю.

Оскільки позиціонування (визначення координат) супутнього сліду РМО в площині зображення здійснюється за рахунок частково-когерентної обробки у вікнах, що мають просторові розміри, порівнянні з розмірами супутнього сліду, похибку визначення координат приблизно можна вважати такою, що дорівнює половині розміру вікна обробки. Враховуючи, що довжина супутнього сліду, в залежності від умов руху РМО, може сягати тисячі та більше метрів, по-

хибка визначення координат супутнього сліду в полі зображення складатиме біля 500 м.

Похибка визначення навігаційних параметрів характеризується середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  вимірювання параметру. Точність вимірювання, яка забезпечується з ймовірністю 0,95, характеризується величиною  $2\sigma$  [5].

Таким чином похибка визначення навігаційних параметрів:

$$\Delta\Lambda_H = 2\sigma.$$

В табл. 1 – 3 наведено величини похибок визначення курсового кута, швидкості та координат аеронавігаційними системами різних видів [5, 6].

Таблиця 1  
Похибки визначення курсового кута аеронавігаційними системами

Вимірювачі	TACAN, РСБН, VOR	Автоматичні радіокомпаси	Інерціальні системи
$2\sigma_K$	0,2° ... 2,5°	4°	0,5°

Таблиця 2  
Похибки визначення швидкості аеронавігаційними системами

Вимірювачі	Допплерівські вимірювачі	GPS, ГЛОНАСС	Інерціальні системи
$2\sigma_V$	< 0,4 м/с*	0,1 м/с	1 м/с ... 6 м/с

\* - для літаків-розвідників та патрульних літаків

Таблиця 3  
Похибки визначення координат аеронавігаційними системами

Вимірювачі	TACAN, РСБН, DME	GPS, ГЛОНАСС
$2\sigma_{x,y}$	40 м ... 300 м	40 м ... 100 м*

\* - без урахування диференційного режиму

Таким чином, в залежності від виду аеронавігаційної системи, похибка вимірювання курсового кута складатиме від 0,2° до 4°, похибка вимірювання швидкості знаходиться в межах 6 м/с, а похибка вимірювання координат становитиме від 40 м до 300 м.

З зазначеного слідує, що більш суттєвий вплив на величину сумарної похибки оцінювання параметрів РМО за зображеннями їх супутних слідів має похибка алгоритму вимірювань  $\Delta\Lambda_A$ . Похибка ви-

значення навігаційних параметрів  $\Delta\Lambda_H$  має менший, але також суттєвий вплив на величину сумарної похибки  $\Delta\Lambda$ . Її величина, в залежності від вимірюваного параметра та виду вимірювача, складатиме від 1 % до 35 % сумарної похибки.

## Висновки

Отже, сутність наведеного підходу щодо оцінювання точності вимірювань параметрів руху морських об'єктів, виявлених за їх супутніми слідами полягає в тому, що насамперед враховуються похибки алгоритму вимірювання (оцінювання) та похибки навігаційної системи літака-носія.

Величина похибки алгоритму оцінювання може бути визначена з розрізняльної здатності алгоритму за кожним з оцінюваних параметрів, яка, в свою чергу, обирається з аналізу функції невизначеності алгоритму.

Внесок похибки визначення навігаційних параметрів в величину сумарної похибки оцінювання параметрів руху РМО є менш суттєвим, ніж внесок похибки алгоритму вимірювань та складатиме до 35 % від сумарної похибки.

## Список літератури

1. Попов М.А. Фотограмметрическая обработка и дешифрирование аэроснимков. Ч. 1. / М.А. Попов, В.Л. Моисеев – К.: КВВАИУ, 1990. – 223 с.
2. Горбань И.И. Обнаружение и измерение скорости хода морских судов по изображению их спутного следа / И.И. Горбань, И.Ю. Целищев // Математичні машини і системи. – 2011. – № 1. – С. 9 – 19.
3. Горбань И.И. Обработка гидроакустических сигналов в сложных динамических условиях / Горбань И.И. – К.: Наукова думка, 2008. – 272 с.
4. Ван Трис Г.Л. Теория обнаружения, оценок и модуляции / Ван Трис Г.Л. – М.: Сов. радио, 1977. – Т. III: Обработка сигналов в радио- и гидролокации и прием случайных гауссовских сигналов на фоне помех. – 662 с.
5. Марков В.И. Воздушная навигация. Учебник / В.И. Марков. – Кировоград: ГЛАУ, 2009. – 452 с.
6. Рогожин В.О. Пилотажно-навигационный комплекс пилотируемых судов: Пособие / В.О. Рогожин, В.М., Сингелазов, М.К. Філяшкін. – К.: НАУ, 2005. – 502 с.

Надійшла до редакції 21.11.2012

Рецензент: д-р техн. наук, доц. С.А. Станкевич, Інститут геологічних наук Національної академії наук України, Київ.

## ПОДХОД К ОЦЕНИВАНИЮ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖУЩИХСЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ, ОБНАРУЖЕННЫХ ПО ИХ СПУТНЫМ СЛЕДАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ ОТ ВИДОВЫХ СРЕДСТВ ВОЗДУШНОЙ РАЗВЕДКИ

И.Ю. Целищев

В статье рассмотрен подход к оцениванию точности измерения параметров движения морских объектов, обнаруженных по изображениям их спутных следов, на основе анализа функций неопределенности алгоритма частично-когерентной обработки изображений взволнованной морской поверхности. Проанализировано влияние на точность измерений ошибок оценивания навигационных параметров самолета-носителя разведывательного оборудования и ошибок алгоритма измерений.

**Ключевые слова:** подвижные морские объекты, ошибка измерения параметров объектов, спутные следы, оптимальная обработка изображений, курсовой угол, скорость движения, навигационные параметры, определение координат.

**APPROACH TO ESTIMATION OF EXACTNESS OF MEASURING MOVING SEA OBJECTS PARAMETERS,  
DETECTED OF THEIR TRACKS WITH THE USE OF IMAGES OBTAINED  
BY AERIAL RECONNAISSANCE SYSTEMS**

I.J. Tselishchev

*In the article introduced approach to estimation of exactness of measuring moving sea objects parameters, detected of their tracks, based on analysis functions of vagueness of partly-coherent image processing. The influence of measuring navigation parameters errors and image processing algorithm errors is analysed.*

**Key words:** *moving sea objects, error of measuring parameters, sheep tracks, optimal image processing, course, velocity, navigation parameters, determination of co-ordinates.*