

**В.М. Горобець, М.І. Головка, С.М. Зотов, О.Л. Коворотний**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: vgorobets777@gmail.com

## **Додаткова радіолокаційна ознака для розпізнавання надводних об'єктів**

**Предмет і мета роботи.** Статтю присвячено радіолокаційному розпізнаванню рухомих надводних об'єктів (морських суден). При розпізнаванні надводних об'єктів кількість радіолокаційних ознак виявляється обмеженою. У першу чергу це стосується когерентних радіолокаційних станцій (РЛС), що працюють у безперервному режимі. Тому пошук додаткових ознак для розпізнавання надводних об'єктів є актуальним завданням. Такі додаткові інформаційні ознаки можуть бути отримані після нескладних математичних перетворень відбитих від надводного об'єкта сигналів. Це є важливим для системи розпізнавання, що уже використовується, тому що не потребує значного ускладнення системи, а отже, і збільшення її вартості.

**Методи і методологія роботи.** Розроблено й апробовано методику одержання радіолокаційної ознаки, притаманної надводним об'єктам, що рухаються по схвильованій морській поверхні. Ця методика дозволяє одержати додаткову радіолокаційну ознаку за допомогою нескладних математичних перетворень сигналу, відбитого від надводного об'єкта, що рухається, з фазового виходу когерентної РЛС. Апробація методики проводилася шляхом математичного моделювання сигналів з виходу фазового детектора від трьох надводних об'єктів, що мають однаковою ефективною площею розсіювання, але різні періоди бортових і кільових коливань.

**Результати роботи.** За результатами математичного моделювання показано, що відношення лінійних швидкостей бортових і кільових коливань кожного із локальних центрів розсіювання залишається приблизно однаковим для одного і того ж об'єкта, але відрізняється для різних об'єктів.

**Висновок.** Розроблена авторами методика дозволяє отримати додаткову ознаку, притаманну певному об'єкту, за допомогою однієї штатної когерентної РЛС, що працює в безперервному режимі. Отже, це відношення може служити додатковою ознакою при розпізнаванні, а методика може бути використана для розпізнавання цілей, що рухаються по схвильованій морській поверхні. Іл. 2. Табл. 2. Бібліогр.: 6 назв.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, розпізнавання, надводні об'єкти, бортова хитавиця, кільова хитавиця.

Розпізнавання являє собою перетворення вхідної інформації, яка характеризує об'єкт, що розпізнається, у вихідну, котра дає висновок, до якого класу належить цей об'єкт.

Розроблення систем розпізнавання і, зокрема, радіолокаційного розпізнавання передбачає вирішення низки задач. Однією з них є формування простору ознак, що використовуються для опису як класів об'єктів, так і самих об'єктів [1].

Імовірність правильного розпізнавання класів або об'єктів у класі безпосередньо залежить від розмірів простору ознак. При заданому просторі ознак та за однакових умов зменшення числа класів приводить до зменшення поми-

лок розпізнавання. При збільшенні числа класів системи розпізнавання з метою підтримки на заданому рівні або навіть зменшення середнього ризику (ймовірності помилкових рішень) треба розширювати словник ознак.

Розширення простору ознак з метою зменшення помилок розпізнавання пов'язане зі збільшенням числа технічних вимірювальних засобів, кожен з яких забезпечує визначення відповідної ознаки або групи ознак. Це призводить до збільшення вартості системи розпізнавання.

Системи розпізнавання не можуть бути універсальними. Кожна з них вирішує конкретну задачу і, відповідно, оперує з певним просто-

ром ознак. У свою чергу, простір ознак визначає склад і технічні характеристики вимірвальних засобів системи розпізнавання [2].

Сукупність ознак повинна найбільшою мірою відображати ті властивості об'єктів, які важливі для їх розпізнавання. Існує велика кількість ознак, які достатньою мірою характеризують об'єкти розпізнавання [1–3].

Для радіолокаційного розпізнавання використовують координатні (висота, швидкість, траєкторія та ін.) і сигнальні ознаки, безпосередньо не пов'язані з координатами об'єкта — вони характеризують часову, просторову, спектральну та поляризаційну структури відбитих від об'єктів сигналів. Крім первинних ознак (сигнатур), існують вторинні ознаки, які пов'язані зі швидкісними характеристиками або ефектами вторинної модуляції (гвинтової, компресорної або турбінної).

Для розпізнавання рухомих надводних об'єктів (морських суден) використовують обмежену кількість радіолокаційних ознак. Це пов'язано як з особливостями, притаманними надводним об'єктам, так і характеристиками системи розпізнавання, в якій використовується вузько-смугова когерентна РЛС сантиметрового діапазону хвиль безперервного випромінювання. Пошук додаткових ознак для розпізнавання надводних об'єктів є актуальним завданням.

Однією з особливостей морських суден як протяжних радіолокаційних цілей є те, що їх еволюція в просторі призводить до виникнення кутових і амплітудних шумів у відбитому сигналі. Шуми заважають вирішувати основні радіолокаційні задачі — виявлення та супровід надводних об'єктів, однак можуть служити інформаційними ознаками для їх класифікації та розпізнавання [4].

Ці додаткові інформаційні ознаки можуть бути отримані після нескладних математичних перетворень відбитих від надводного об'єкта сигналів. Такий підхід дозволяє використовувати вже наявні системи розпізнавання, тому не потребує значного ускладнення системи, а отже, і збільшення її вартості. Додаткові ознаки, пов'язані з хитавицею об'єкта на морському хвилюванні, є індивідуальними ознаками кожного з надводних об'єктів, що розпізнаються.

**1. Деякі відомості з гідродинамічної теорії хитавиці.** Поведінка рухомого надводного

об'єкта достатньо добре описується гідродинамічною теорією хитавиці [5].

Для обґрунтування математичних перетворень, що проводяться з метою отримання додаткової ознаки для розпізнавання, доцільно навести деякі відомості з гідродинамічної теорії хитавиці корабля і показати, яким чином коливання об'єкта можуть бути представлені у відбитому сигналі РЛС.

Хитавицею називають коливальний рух корабля, який відбувається під впливом зовнішніх збурень. Корабель, що рухається, має шість степенів вільності, тому розглядають три види поступального руху судна (уздовж координатних осей) і три види обертального руху (навколо координатних осей). Цим рухам відповідають шість видів хитавиці — поздовжньо-горизонтальна, поперечно-горизонтальна, вертикальна, бортова, кильова та рискання.

Вважається, що вертикальна та кильова, а також поперечно-горизонтальна і бортова хитавиці відбуваються одночасно. Поздовжньо-горизонтальна хитавиця практично не впливає на вертикальну та кильову хитавиці і не залежить від них. Користуючись термінологією, відомою з теоретичної механіки, можна сказати, що перші три види хитавиці — це поступальний рух корабля разом з центром тяжіння  $G$ , а останні три — відносний рух корабля навколо осей, що проходять через центр тяжіння.

З усіх видів хитавиці особливий практичний інтерес представляють бортова і кильова хитавиці, які супроводжуються великими відхиленнями корабля від положення рівноваги, викликають різке погіршення морехідних якостей і, в першу чергу, остійності.

Відповідно до лінійної теорії хитавиці, бортові та кильові коливання мають гармонічний характер. У лінійному наближенні та у припущенні незалежності бортової і кильової хитавиць закони коливань об'єкта матимуть вигляд [4, 5]:

$$\alpha_B(t) = \alpha_{0B} \sin(\Omega_B t + \varphi_{0B}),$$

$$\alpha_K(t) = \alpha_{0K} \sin(\Omega_K t + \varphi_{0K}),$$

де  $\Omega_B = 2\pi/T_B$  і  $\Omega_K = 2\pi/T_K$  — власні частоти бортової і кильової хитавиць;  $\alpha_{0B}$  і  $\alpha_{0K}$  — амплітуди бортової та кильової хитавиць;

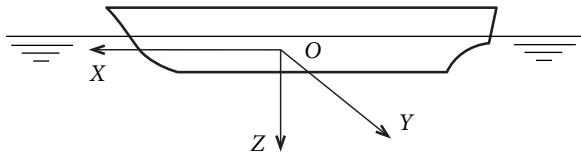


Рис. 1. Система координат для корабля на морській поверхні

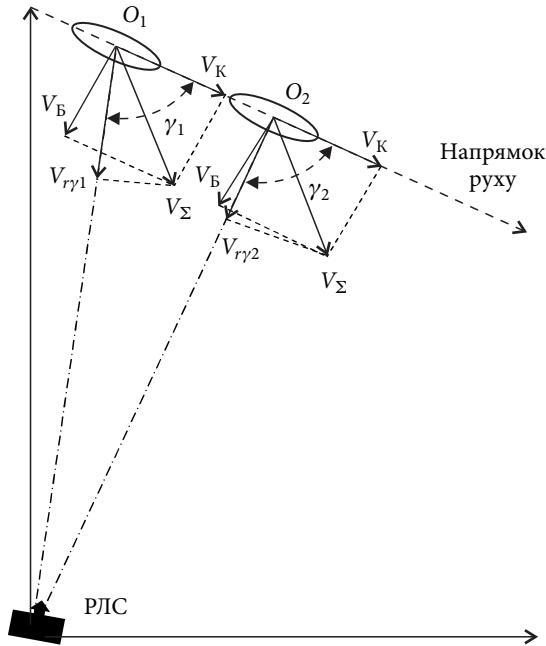


Рис. 2. Взаємне розташування РЛС і корабля при його рівномірному і прямолінійному русі

$T_B = 2\pi \sqrt{\frac{I_X + M_{44}}{mgh}}$  і  $T_K = 2\pi \sqrt{\frac{I_Y + M_{55}}{mgH}}$  – періоди бортової і кільової хитавиць;  $I_X$  і  $I_Y$  – моменти інерції маси відносно осей бортової і кільової хитавиць;  $M_{44}$  і  $M_{55}$  – приєднані маси при бортовій і кільовій хитавицях, що залежать від форми зануреної частини корабля;  $h$  і  $H$  – поперечна і поздовжня метацентричні висоти;  $m$  – маса корабля.

Значення фізичних величин, що входять до формули для визначення періодів бортової і кільової хитавиць кораблів різних типів, відрізняються, тому будуть відрізнятися і періоди бортової та кільової хитавиць.

Таким чином, виділяючи величини періодів бортових і кільових коливань або їх комбінації, можна отримати ознаки, що відповідають конкретним типам кораблів.

**2. Зв'язок між фізичними параметрами хитавиці корабля і сигналом РЛС.** Радіолокацій-

ний надводний об'єкт являє собою, як правило, провідне тіло певної просторової конфігурації, яке робить складні переміщення в часі і просторі. Фізичними ознаками такого об'єкта є його геометричні, динамічні та кінематичні характеристики: відносно велика протяжність, складність архітектури надбудов, а також коливання всього об'єкта і його частин під впливом морського хвилювання.

У найбільш простому випадку надводний об'єкт (корабель) можна подати у вигляді геометрично жорстко зв'язаного ансамблю з  $N$  локальних центрів розсіювання (ЛЦР), розміщених у межах об'єкта, які рухаються спільно з ним відповідно до законів кінематики твердого тіла [4].

Найбільш істотний вплив на розсіяний сигнал від корабля чинять бортова і кільова хитавиці за умови, що різниця між рівнями розташування РЛС і корабля відносно горизонталі значно менша за відстань між ними.

Бортова хитавиця відбувається навколо осі  $OX$ , яка збігається з поздовжньою віссю судна і проходить через діаметральну площину корабля, а кільова – навколо осі  $OY$  нерухомої системи координат, початок якої  $O$  збігається з центром тяжіння корабля  $G$  (рис. 1). Діаметральною площиною називається вертикальна поздовжня площина симетрії теоретичної поверхні корпусу корабля.

На рис. 2 схематично зображено два положення  $O_1$  і  $O_2$  корабля, який рухається відносно РЛС під різними кутами  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$ . Вектори швидкостей  $V_K$  і  $V_B$  будь-якого ЛЦР при кільовій і бортовій хитавицях знаходяться в ортогональних площинах.

У загальному випадку, при курсовому куті  $\gamma$  між діаметральною площиною корабля та лінією візування РЛС  $r$ , сумарна складова проєкції лінійних швидкостей кільової і бортової хитавиць на лінію візування буде дорівнювати

$$\overline{V}_{\Sigma r}^{\gamma} = \overline{V}_{K r}^{\gamma} + \overline{V}_{B r}^{\gamma} = \overline{V}_K \cos \gamma + \overline{V}_B \sin \gamma.$$

Для двох положень корабля можна скласти систему рівнянь:

$$\begin{cases} \overline{V}_{\Sigma r}^{\gamma_1} = \overline{V}_K \cos \gamma_1 + \overline{V}_B \sin \gamma_1, \\ \overline{V}_{\Sigma r}^{\gamma_2} = \overline{V}_K \cos \gamma_2 + \overline{V}_B \sin \gamma_2. \end{cases}$$

У результаті розв'язання рівнянь щодо  $V_K$  і  $V_B$  отримаємо:

$$V_K = \frac{V_{\Sigma r}^{\gamma_1} \sin \gamma_2 - V_{\Sigma r}^{\gamma_2} \sin \gamma_1}{\cos \gamma_1 \sin \gamma_2 - \cos \gamma_2 \sin \gamma_1},$$

$$V_B = -\frac{V_{\Sigma r}^{\gamma_1} \cos \gamma_2 - V_{\Sigma r}^{\gamma_2} \cos \gamma_1}{\cos \gamma_1 \sin \gamma_2 - \cos \gamma_2 \sin \gamma_1}.$$

При когерентній обробці сигнал, відбитий кораблем, на виході фазового детектора (ФД) РЛС має вигляд:

$$u_{\text{ФД}}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{u_i(t)}{2} \cos[\omega_{\text{ДП}} t + \beta_i(t)], \quad (1)$$

де  $\omega_{\text{ДП}} = \frac{2\pi V_r^\gamma}{\lambda}$  — кутова доплерівська частота, обумовлена поступальною швидкістю корабля;  $\beta_i(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t V_{\Sigma r}^\gamma(t) dt$  — характеризує хитавицю корабля відносно точки  $O$  (рис. 1);  $\lambda$  — довжина хвилі РЛС;  $V_r^\gamma$  — поступальна швидкість корабля;  $V_{\Sigma r}^\gamma$  — швидкість руху ЛЦР навколо точки  $O$ ;  $u_i(t)$  — амплітуда сигналу  $i$ -го ЛЦР.

Перший доданок у виразі (1) призводить до зсуву всього доплерівського спектра по осі частот і не містить ніякої інформації про рух ЛЦР відносно один одного. Другий доданок безпосередньо пов'язаний зі зміною координат кожного з ЛЦР, викликаною хитавицею корабля.

Як можна бачити з виразу (1), сигнал на виході ФД є частотно-модульоване коливання з центральною частотою  $\omega_{\text{ДП}}$ , що відповідає швидкості руху точки  $O$ , і модулюючим сигналом  $\beta_i(t)$ . Ширина смуги спектра сигналу при частотній модуляції кількома гармонічними функціями дорівнює сумі ширин спектрів кожної з функцій [6].

Отже, для бортової і кільової хитавиць можна записати:

$$\Delta F_i = \Delta F_{iB} + \Delta F_{iK}.$$

Таким чином, ширина смуги спектра дорівнює сумі ширин спектрів бортової і кільової хитавиць. З огляду на те, що ширини спектрів  $\Delta F_{iB}$  і  $\Delta F_{iK}$  пропорційні лінійним швидкостям бортової і кільової хитавиць  $\bar{V}_{Br}^\gamma$  і  $\bar{V}_{Kr}^\gamma$ , то і сумарна ширина спектра сигналу буде про-

порційна сумарній складовій лінійних швидкостей бортової і кільової хитавиць. Вимірюючи ширину доплерівського спектра сигналу, відбитого від корабля, на виході фазового детектора РЛС можна визначити сумарний вектор швидкості бортових і кільових коливань корабля. Знаючи напрямок руху корабля і ракурсний кут, можна визначити коефіцієнт  $K$ :

$$K = \left| \frac{V_B}{V_K} \right| = \left| \frac{V_{\Sigma r}^{\gamma_1} \cos \gamma_2 - V_{\Sigma r}^{\gamma_2} \cos \gamma_1}{V_{\Sigma r}^{\gamma_1} \sin \gamma_2 - V_{\Sigma r}^{\gamma_2} \sin \gamma_1} \right|. \quad (2)$$

Оскільки періоди і кути бортової та кільової хитавиць істотно не змінюються при незмінності швидкості і напрямку руху корабля за невеликий проміжок часу, а хвилювання морської поверхні однакове на цьому відрізку шляху, можна вважати, що відношення лінійних швидкостей (2) буде залишатися приблизно однаковим. Тому цей коефіцієнт може бути обраний в якості додаткової ознаки при розпізнаванні.

Для підтвердження цього висновку було проведено математичне моделювання сигналу, от-

Таблиця 1. Параметри рухомих надводних об'єктів ( $F_{\text{ДП}} = 60$  Гц,  $\lambda = 0,03$ )

№ об'єкта	$T_K, \text{с}$	$T_B, \text{с}$	$\alpha_{\text{ок}}, ^\circ$	$\alpha_{\text{об}}, ^\circ$	$h, \text{м}$
1	9	4	8	13	2
2	11	5	8	13	2
3	15	12	6	4	9

Таблиця 2. Результати обчислень коефіцієнта  $K$  для трьох рухомих надводних об'єктів

№ об'єкта	Параметр	Числове значення				
		$\gamma_1$	$\gamma_2$	$K$	$K_{\text{серед.}}$	
1	$\gamma_1$	5	9	11	19	23
	$\gamma_2$	7	11	13	21	25
	$K$	4,69	4,43	4,94	4,41	4,17
	$K_{\text{серед.}}$	4,528				
2	$\gamma_1$	7	9	11	15	19
	$\gamma_2$	9	11	13	17	21
	$K$	3,4	3,71	3,02	2,69	3,25
	$K_{\text{серед.}}$	3,214				
3	$\gamma_1$	5	9	13	17	21
	$\gamma_2$	9	13	17	21	25
	$K$	1,83	1,35	2,53	1,79	1,95
	$K_{\text{серед.}}$	1,89				

риманого з виходу фазового детектора РЛС [4]:

$$u_{\Phi Д}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{u_i}{2} \cos[\omega_{ДП} t - \frac{4\pi h_i}{\lambda} (\alpha_{0К} \Omega_K \cos \gamma \int_0^t \cos(\Omega_K t + \varphi_{0К}) dt + \alpha_{0Б} \Omega_B \sin \gamma \int_0^t \cos(\Omega_B t + \varphi_{0Б}) dt) + \Phi_i],$$

де  $\Phi_i$  — початкова фаза  $i$ -го ЛЦР.

Моделювання проводилося для трьох об'єктів. Для спрощення розрахунків кожен з об'єктів був представлений одним ЛЦР з однаковими ефективними поверхнями розсіювання. Параметри об'єктів наведені у табл. 1.

Для різних кутів на рівні 0,1 від амплітудного значення спектра прийнятих сигналів за допомогою аналізатора визначалася ширина

спектра отриманого сигналу і за формулою (2) обчислювався коефіцієнт  $K$ . Дані обчислень наведені в табл. 2.

З таблиці випливає, що відношення лінійних швидкостей  $K_{\text{серед.}}$  залишається приблизно однаковим для одного і того ж об'єкта, але відрізняється для різних об'єктів. Отже, це відношення може служити додатковою ознакою для розпізнавання рухомих надводних об'єктів.

**Висновки.** Розроблена авторами методика дозволяє отримати додаткову радіолокаційну ознаку, притаманну певному об'єкту, за допомогою однієї штатної когерентної РЛС, що працює в безперервному режимі, із застосуванням нескладної математичної обробки при вимірюванні з однієї позиції РЛС, але через певний проміжок часу. Можна отримувати цю ж додаткову ознаку, використовуючи двопозиційну локацію.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Горелик А.Л., Гуревич И.Б., Скрипкин В.А. *Современное состояние проблемы распознавания*. Москва: Радио и связь, 1985. 160 с.
2. Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.Л., Эпштейн С.С. *Селекция и распознавание на основе локационной информации*. Москва: Радио и связь, 1990. 220 с.
3. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П., Орленко В.М. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование. *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники*. 1996. № 11. С. 3–62.
4. Gorobets V.N., Gutnik V.G., Zotov S.M., Kivva F.V. Mathematical model of the radar image of a ship moving in a seaway. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2014. Vol. 73, Iss. 6. P. 537–546. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i6.60.
5. Ремез Ю.В. *Качка корабля*. Ленинград: Судостроение, 1983. 324 с.
6. Латхи Б.П. *Системы передачи информации*. Пер. с англ. Москва: Связь, 1971. 318 с.

Стаття надійшла 16.09.2021

#### REFERENCE

1. Gorelik, A.L., Gurevich, I.B., Skripkin, V.A., 1985. *The current state of the recognition problem*. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
2. Gorelik, A.L., Barabash, Y.L., Krivosheyev, O.V., Epstein, S.S., 1990. *Selection and recognition based on radar information*. Moscow: Radio i svyaz' Publ. (in Russian).
3. Shirman, J.D., Gorshkov, S.A., Leschenko, C.P., Orlenko, V.M., 1996. Radar recognition. Methods and modeling. *Zarubezhnaya radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 11, pp. 3–62 (in Russian).
4. Gorobets, V.N., Gutnik, V.G., Zotov, S.M., Kivva, F.V., 2014. Mathematical model of the radar image of a ship moving in a seaway. *Telecommunications and Radio Engineering*. 73(6). P. 537–546. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v73.i6.60.
5. Remez, Yu.V., 1983. *Ship Oscillation Motion*. Leningrad: Sudostroenie Publ. (in Russian).
6. Lathi, B.P., 1968. *Communication systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Received 16.09.2021

V.M. Gorobets', M.I. Golovko, S.M. Zotov, L.O. Kovorotny

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine  
E-mail: vgorobets777@gmail.com

#### ADDITIONAL RADAR SIGNATURE FOR WATERBORNE OBJECT RECOGNITION

**Subject and Purpose.** The article is devoted to the radio recognition of moving waterborne objects (sea-going ships). The problem lies in the lack of radar signatures, which is especially true for coherent radar in continuous mode, implying that more signatures for the waterborne object recognition is highly needed. An additional signature can be gained just by means of a simple

mathematical processing of target reflection signals. This is particularly important for radio recognition systems in current use because this will hardly complicate the system structure. Hence, it will not affect its cost either.

**Methods and Methodology.** The method developed for the retrieval of an additional radar signature characteristic of waterborne objects moving across a rough sea surface is based on a simple mathematical processing of a signal reflected from the moving waterborne object and taken from the phase output of coherent radar. The method approbation is by the mathematical modeling of signals at the phase detector output in the event of three waterborne objects such that have identical scattering cross sections but different periods of the side and keel vibrations.

**Results.** Based on the mathematical modeling results, it has been shown that each of the local scattering centers keeps the ratio of the linear speeds of side and keel vibrations approximately the same for the same object. But the employed ratio takes different values for different objects.

**Conclusion.** Having a single standard coherent radar in continuous mode and guided by the developed methodology, one can gain an additional signature for the target recognition, which is a ratio of the linear speeds of side and keel vibrations of the target. The suggested methodology can be used for the radio recognition of waterborne objects moving across a rough sea surface.

**Key words:** *radar, recognition, waterborne object, side vibration, keel vibration.*