

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.03.174>
УДК 621.396.96

В.М. Горобець¹, М.І. Головка¹, В.Г. Гутнік², С.М. Зотов¹

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна
E-mail: vgorobets777@gmail.com

² Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: vicgut@i.ua

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ В УМОВАХ МОРСЬКОГО ХВИЛЮВАННЯ

Предмет і мета роботи. Знання параметрів хитавиці корабля в умовах морського хвилювання є важливим для низки прикладних задач, зокрема оцінки остійності та розпізнавання типу морського судна. Основними параметрами хитавиці корабля є амплітуда та частота (або період) його коливань. Предметом дослідження є доплерівські спектри сигналів, відбитих від рухомого корабля в умовах морського хвилювання. Метою роботи є визначення періоду бортової хитавиці корабля шляхом спектральної обробки сигналів, розсіяних кораблями різних типів в умовах морського хвилювання.

Методи та методологія. Для досягнення поставленої мети використано математичні розрахунки та натурні експериментальні дослідження. Теоретично розраховано середні періоди бортової хитавиці на основі гідродинамічної теорії хитавиці для нерегулярного хвилювання. Натурні експериментальні дослідження проводилися в умовах морського хвилювання силою три-чотири бали з кораблями, що значно відрізнялися за габаритами та водотоннажністю. Періоди бортової хитавиці визначалися за допомогою аналізу послідовності миттєвих доплерівських спектрів сигналів, відбитих від кораблів. Отримані результати математичних розрахунків порівняно з експериментальними даними.

Результати роботи. За результатами вимірювань отримано миттєві спектри доплерівських сигналів, розсіяних кораблями двох типів на різних дальностях. Проведено порівняння середніх періодів бортової хитавиці та їхньої дисперсії, отриманих під час обробки експериментальних даних, з результатами теоретичних розрахунків середніх періодів бортової хитавиці. Результати порівняння підтверджують обґрунтованість вихідних припущень щодо наявності у відбитому сигналі частот, пов'язаних із хитавицею корабля. Дослідження продемонструвало добрий збіг результатів порівняння для двох кораблів різних типів.

Висновки. Доплерівські сигнали, розсіяні рухомим кораблем в умовах морського хвилювання, містять інформацію, яка при відповідній обробці дозволяє визначити середній період бортової хитавиці. Це дає змогу проводити дистанційне вимірювання періоду хитавиці з подальшим використанням цієї інформації для розв'язання як навігаційних задач, так і задач розпізнавання надводних об'єктів.

Ключові слова: радіолокаційні вимірювання, розсіяння, доплерівський спектр, бортова хитавиця корабля.

Цитування: Горобець В.М., Головка М.І., Гутнік В.Г., Зотов С.М. Радіолокаційне визначення періоду хитавиці корабля в умовах морського хвилювання. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 3. С. 174–182. <https://doi.org/10.15407/rpra30.03.174>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

Вступ

Більшість радіолокаційних морських цілей, таких як корабель (судно), мають складну форму поверхні. Сумарний сигнал, розсіяний такими об'єктами, є векторною сумою сигналів, розсіяних окремими ділянками поверхні [1]. Численні експериментальні дослідження підтверджують наявність ділянок інтенсивного розсіювання — так званих локальних центрів розсіювання (ЛЦР) — на поверхні об'єктів складної форми, зокрема кораблів і літаків. Топологія ділянок поверхні кораблів більш різноманітна, ніж у літаків, проте кількість ЛЦР у них є невеликою. Експериментально встановлено, що всього три-чотири ділянки поверхні корабля формують понад 90 % потужності розсіяного сумарного сигналу. Сигнал, розсіяний кораблем, є модульованим. Модуляція відбувається за рахунок випадкових переміщень корабля щодо заданого курсу, нерівномірності його ходу, а також динамічних впливів морського хвилювання. Ці фактори призводять до зміни амплітуд і фаз сигналів окремих ЛЦР.

У доплерівських радіолокаційних станціях (РЛС) випадкові рухи радіолокаційної цілі (корабель, літак тощо), викликані різними зовнішніми впливами, призводять до того, що спектр розсіяного сигналу містить не одну доплерівську лінію, а займає певну смугу частот з максимумом, що відповідає середній радіальній швидкості [1]. Найбільш значущий зовнішній вплив на корабель чинить морське хвилювання, яке спричиняє хитавицю. Хитавиця, у свою чергу, суттєво впливає на морехідні якості корабля.

Відомо [2], що корабель як динамічна система під впливом морського хвилювання має шість степенів вільності: три лінійні переміщення центру тяжіння вздовж координатних осей та три кутові обертання навколо цих осей. Цим шести степеням вільності відповідають шість видів хитавиці, які поділяються на три основні та три додаткові. До основних видів хитавиці належать бортова, кільова та вертикальна. Додатковими видами хитавиці є позовжньо-горизонтальна, поперечно-горизонтальна та рискання.

Аналіз впливу зазначених видів хитавиці на характеристики сигналу, розсіяного кораблем, що розглядається як сукупність ЛЦР, свідчить про переважний вплив основних видів хитавиці на характеристики доплерівського сигналу

(ширину і форму спектра), розсіяного кораблем. При цьому вертикальна хитавиця виключається з розгляду, оскільки вона практично не впливає на інформацію про образ цілі в доплерівському спектрі [3].

Хитавиця є важливим фактором, що впливає на морехідні якості корабля і насамперед на остійність. Одним із способів контролю остійності корабля у процесі його експлуатації є вимірювання періоду хитавиці. Цю функцію виконують автоматичні системи, встановлені на кораблі [4, 5].

Однак інформація про період хитавиці може бути корисна не тільки для контролю остійності, але і для розпізнавання типу корабля, оскільки період хитавиці безпосередньо пов'язаний з такими параметрами корабля як довжина, ширина, водотоннажність і метacentрична висота.

Ця інформація може бути отримана дистанційно за допомогою доплерівської РЛС. Оскільки спектральна щільність сигналу, розсіяного кораблем, характеризує розподіл енергії за частотами, можна припустити, що в спектрі доплерівського сигналу повинні бути присутні спектральні складові з частотами, що відповідають періодам бортової і кільової хитавиць корабля. Причому для різних типів кораблів вони мають бути різними.

Метою роботи є визначення періоду бортової хитавиці корабля шляхом спектральної обробки сигналів, розсіяних кораблями різних типів в умовах морського хвилювання. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

- провести короткий огляд теорії хитавиці корабля;
- отримати експериментальні миттєві доплерівські спектри сигналів, відбитих кораблями, що значно відрізняються габаритами та рухаються в умовах морського хвилювання;
- показати, що зміни центру ваги експериментальних миттєвих доплерівських спектрів містять інформацію про період хитавиці корабля;
- провести теоретичні розрахунки періодів хитавиці корабля;
- виконати порівняльний аналіз масивів експериментальних та розрахункових даних і на його основі підтвердити припущення про наявність у відбитому сигналі частот, що відповідають частотам хитавиці корабля.

1. Введення в теорію хитавиці корабля

Хитавиця — це коливальні рухи, що здійснюються кораблем під впливом зовнішніх сил (вітру, хвиль та інших чинників). Основним фактором, який впливає на хитавицю, є хвилювання. Хитавиця, як і будь-який коливальний процес, характеризується амплітудою, періодом (або частотою) та зсувом фаз коливань відносно хвилі.

При вивченні основних видів хитавиці розрізняють два типи коливань: власні та вимушені. Власні коливання розглядаються як коливання корабля на тихій воді після припинення зовнішнього впливу. Вони залежать лише від конструктивних параметрів корабля (довжини, ширини, метацентричної висоти). Вимушені коливання, окрім конструктивних параметрів, залежать від зовнішніх впливів і, насамперед, від хвилювання. Ці дії відбуваються безперервно.

Якщо хвилювання має регулярний характер і період власних коливань судна значно відрізняється від періоду хвилювання, судно коливається з періодом хвилювання. У деяких випадках при регулярному хвилюванні можливе таке явище, як параметричний резонанс. Параметричний резонанс виникає на зустрічних та кормових хвилях, коли довжина хвилі приблизно дорівнює довжині судна, а період зустрічі з хвилею дорівнює або близький до періоду власних коливань.

Якщо хвилювання має нерегулярний характер і періоди хвиль змінюються в певних межах, то при збігу власного періоду хитавиці із середнім періодом хвилювання також настає резонанс. Проте змінність періоду хвилювання в цьому випадку дещо послаблює його дію.

У теорії нерегулярної хитавиці корабель розглядається як певна динамічна система, що перетворює випадковий процес хвилювання на випадковий процес хитавиці.

Розвинене морське хвилювання та хитавиця корабля належать до великого класу випадкових процесів, які називаються стаціонарними. При перетворенні стаціонарного випадкового процесу (хвилювання) лінійною динамічною системою, якою є корабель, амплітуди вхідного збурення множаться на модуль частотної характеристики [2].

Таким чином, коливання корабля визначаються багатьма факторами, пов'язаними не лише з параметрами самого корабля (водотоннажністю,

формою підводної частини, основними конструктивними параметрами — довжиною, шириною, поперечною та поздовжньою метацентричними висотами), а й зі станом морської поверхні (спектром амплітуд морського хвилювання, відносною швидкістю та напрямком хвиль).

2. Експериментальні дослідження. Методика та апаратура

Для проведення експериментальних досліджень з метою виявлення у відбитому від корабля доплерівському сигналі спектральних складових, пов'язаних із періодами бортової та кільової хитавиці, а також встановлення зв'язку між частотами цих спектральних складових і параметрами морського хвилювання та характеристиками корабля, було розроблено методику досліджень і створено вимірювальний макет.

Відповідно до теорії, викладеної в [3], корабель розглядається як просторовий ансамбль N ділянок, що розсіюють електромагнітні хвилі, розташованих у межах діаграми направленості РЛС і пов'язаних з його архітектурою. Кожна i -та ділянка, так званий локальний центр розсіювання (ЛЦР), розглядається як незалежний перевипромінювач із певною ефективною площею розсіювання (ЕПР). Під час руху корабля по схвилюваній морській поверхні ЛЦР здійснюють коливання з певною швидкістю та амплітудою. Інформація про ці рухи міститься в доплерівському спектрі сигналу, розсіяного від корабля, що отримується з виходу доплерівської РЛС.

Експерименти включали отримання доплерівських сигналів, розсіяних кораблями під час їхнього руху на наближення та віддалення під різними заданими курсовими кутами β . Для досліджень використовувалися кораблі двох типів різної водотоннажності, у подальшому — ПКР та ОС. Технічні характеристики кораблів наведено в табл. 1. В експериментах кораблі рухалися з постійною швидкістю. Під час руху корабля в кожен момент часу фіксувалися його координати та стан морської поверхні — бальність хвилювання й напрямок поширення хвиль.

Вимірювання здійснювалися за допомогою вимірювального комплексу, що включав макет когерентної РЛС безперервного випромінювання з нульовою проміжною частотою та систему реєстрації.

Основні параметри вимірювального комплексу:

- сигнал, що випромінюється — безперервний;
- довжина хвилі — 4.28 см;
- потужність, що випромінюється — 30 Вт;
- ширина діаграми направленості в горизонтальній і вертикальній площинах — 0.8°;
- полоса частот аналізу — 0.01...20.0 кГц;
- порогова чутливість — 186 дБ·Вт;
- енергетичний потенціал — 250 дБ·Вт.

Детальніше технічні та конструктивні характеристики вимірювального комплексу, а також умови проведення експериментів описано в роботах [7, 8].

Сигнали доплерівської частоти з виходу макета вимірювальної РЛС у діапазоні 0.01...20.0 кГц аналізувалися в динамічному діапазоні до 40 дБ кінцевим пристроєм макета — аналізатором спектра типу СК4-72 — і паралельно записувалися на магнітний накопичувач типу НО-67. Також на магнітний накопичувач записувалися координати кораблів. Подальша обробка отриманих результатів здійснювалася на ПК.

У результаті вимірювань було отримано спектри доплерівських сигналів, розсіяних кораблями двох типів на різних дальностях. Хвилювання моря становило 3—4 бали. Для досліджень використовувалися ділянки траєкторії кораблів із курсовими кутами 30° (для ПКР) та 50° (для ОС).

3. Теоретичні розрахунки періодів хитавиці корабля в умовах морського хвилювання

Для проведення попередніх розрахунків необхідно задати такі вихідні дані: енергетичний спектр морського хвилювання, що характеризує стан морської поверхні в місці проведення експериментів, і технічні характеристики кораблів, які брали участь в експериментах.

Існує кілька аналітичних залежностей для опису енергетичних частотних спектрів хвилювання. На підставі наявних на цей час даних в якості типового частотного спектра реального морського хвилювання рекомендується двопараметричний спектр А.І. Вознесенського [6]:

$$S_{\zeta}(\omega) = 9.43 \left(\frac{m_0}{\omega} \right)^6 \exp \left[-1.5 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right],$$

де $m_0 = D_{\zeta}$ — дисперсія хвильових ординат;

$\bar{\omega} = 2\pi / \bar{\tau}$ — середня частота хвилювання; ω_m — частота максимуму спектра; $\bar{\tau}$ — середній період хвилювання.

Основні параметри розрахункового енергетичного спектра для морського хвилювання силою 3—4 бали наведено в табл. 2.

Поверхня моря в загальному випадку має тривимірний характер, і такі поняття, як висота та середній період хвилі, є умовними. Проте ця умовність дає змогу отримувати прийнятні практичні результати під час розрахунків параметрів хитавиці корабля.

Для розрахунків параметрів хитавиці корабля були використані значення характеристик кораблів, що брали участь у експерименті (табл. 1).

Як було зазначено вище, різке збільшення амплітуди коливань відбувається у разі, коли настає резонанс, тобто коли довжина хвилі порівнянна

Таблиця 1. Технічні характеристики кораблів типів ПКР і ОС

Характеристики корабля	Тип корабля	
	ПКР	ОС
Довжина, м	189.1	74.0
Довжина ватерлінії, м	176	69
Ширина, м	25.9	8.5
Осадка, м	7.7	1.8
Водотоннажність, т	15280	800
Об'ємна водотоннажність, м ³	14000	750
Висота борту, м	12	2.9
Початкова метацентрична висота, м	1.6	0.89
Швидкість, вузли	6.75	3.8

Таблиця 2. Параметри розрахункового енергетичного спектра

Параметр	Ступінь хвилювання, бали	
	3	4
Висота хвилі $h_{3\%}$, м	1.25	2.0
Середній період хвилювання $\bar{\tau}$, с	3.7	4.5
Дисперсія хвильових ординат D_{ζ} , м ²	0.056	0.143
Середня частота хвилювання $\bar{\omega}$, с ⁻¹	1.70	1.39
Частота максимуму спектра ω_m , с ⁻¹	1.32	1.08

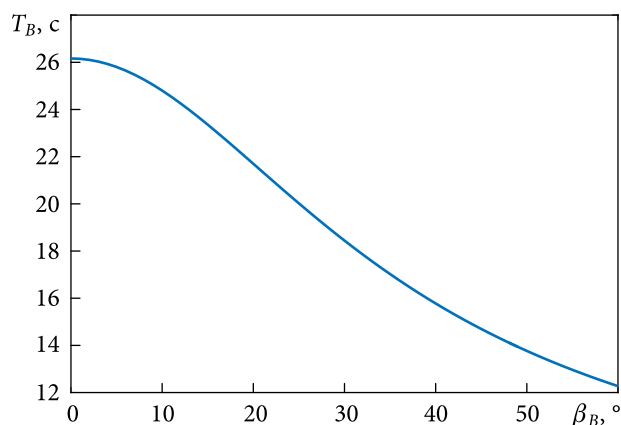


Рис. 1. Середній період бортової хитавиці ПКР

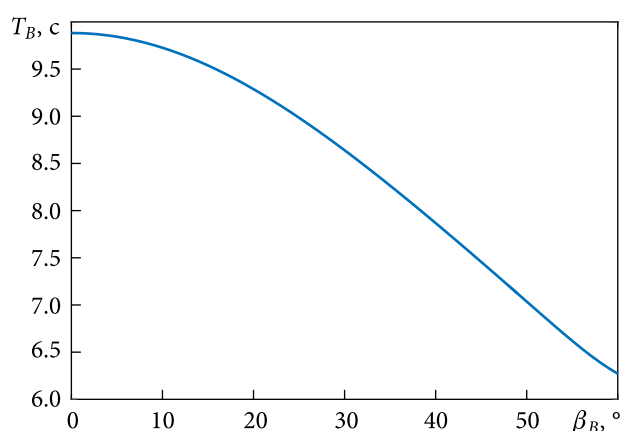


Рис. 2. Середній період бортової хитавиці ОС

з відповідним геометричним розміром корабля. Розглядаючи геометричні розміри кораблів, що брали участь в експерименті (табл. 1), і можливі довжини хвиль ($\lambda = 16 \dots 25$ м) [9], що відповідають 3–4 балам хвилювання ($\bar{\tau} = 3.7 \dots 4.5$ с, табл. 2), можна стверджувати, що хвилі такої довжини істотно впливатимуть тільки на бортову хитавицю і практично не збуджуватимуть кильову хитавицю в цих кораблів. З огляду на ці міркування, надалі розрахунки параметрів хитавиці та порівняння з експериментом проводилися тільки для бортової хитавиці.

Для розрахунку статистичних характеристик бортової хитавиці була використана методика, викладена в роботах [2, 6]. За результатами розрахунків було отримано залежності середніх періодів бортової хитавиці кораблів $\bar{T}_B$ від кута β_B (де β_B — кут між вектором швидкості судна і генеральним напрямком поширення хвиль) для умов проведення експерименту (бальність моря,

напрямок руху хвиль тощо). На рис. 1 та 2 наведено залежності середніх періодів бортової хитавиці ПКР та ОС, відповідно.

4. Обробка та аналіз отриманих результатів

У результаті натурних експериментів було отримано часові реалізації сигналів, розсіяних від кораблів двох типів різної водотоннажності.

Щоб порівняти результати розрахунків параметрів бортової хитавиці корабля, які були отримані на основі гідродинамічної теорії хитавиці, з результатами радіолокаційних вимірювань, для подальшої обробки вибиралися певні ділянки траєкторії руху корабля, для яких проводилися попередні розрахунки. Наприклад, для корабля ОС такими ділянками були ті, де корабель рухався з азимутом $84 \dots 100^\circ$ ($\beta_B = 38 \dots 54^\circ$) на дальності $2000 \dots 5500$ м, а для ПКР — ділянки з азимутом $98 \dots 100^\circ$ ($\beta_B = 30^\circ \dots 32^\circ$) на дальності $4000 \dots 13\,000$ м.

Приклад доплерівських спектрів сигналів, отриманих з виходу фазового детектора РЛС, представлено на рис. 3 у вигляді спектрограм. Спектрограму отримано за допомогою програмного пакета SpectraLAB за період часу 3 хв. Як видно з рисунка, протягом вимірювання суттєво змінюється форма спектра, а також спостерігається зміщення всього спектра вздовж осі частот.

Як було показано в роботі [3], інформація, що дає змогу судити по поведінку корабля в умовах морського хвилювання, міститься в параметрах доплерівського спектра (частота максимуму, ширина спектра тощо). Передбачається, що хитавиця корабля проявляється у змінах середньої доплерівської частоти в часі, тому для визначення характерних частот, які відповідають кильовій та бортовій хитавиці корабля, необхідно провести спектральний аналіз цієї залежності. За умови досить великого усереднення частота доплерівського спектра збігається з його максимумом [1]. У нашому випадку, коли довжина реалізації становить одиниці секунд, визначення максимуму спектра, зумовленого середньою швидкістю, може призвести до значної помилки. Тому середню доплерівську частоту визначатимемо за положенням центру ваги миттєвого доплерівського спектра. У контексті спектрального ана-

лізу центр ваги можна представити як «середньозважену» частоту, де вагами є спектральна щільність потужності.

Методика обробки сигналів, відбитих від кораблів, полягала в наступному. Для обробки використовувалися сигнали, відбиті від кораблів, що перебували на різних фіксованих відстанях від РЛС і рухалися прямолінійно з фіксованою швидкістю. Сигнали з фазового детектора РЛС записувалися на магнітні носії для подальшої обробки. Довжина реалізацій при цьому становила 5–10 хв. Потім цю реалізацію ділили на наперед визначену кількість коротких реалізацій, довжина яких дорівнювала одиницям секунд. Усі реалізації оброблялися за допомогою програмного забезпечення Matlab. Проводилася спектральна обробка кожної з коротких реалізацій, і визначався центр ваги спектра кожної реалізації. Масив цих значень являє собою реалізацію залежності зміни середньозваженої доплерівської частоти від часу.

Оцінка амплітуд коливань кожної з частот у цій реалізації може бути виконана за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Разом з тим, через наявність великої кількості шумів, присутніх у сигналі, а також ураховуючи, що час спостереження за поточним процесом невеликий, за отриманим спектром важко судити про переважуючу гармоніку в сигналі та її амплітуду. Більш інформативним є спосіб побудови спектра методом MUSIC (Multiple Signal Classification) [10, 11]. Він дає змогу не розраховувати спектр як такий, а визначити частоти та рівні (амплітуд чи потужностей) основних гармонічних складових сигналу та відфільтрувати шум. З цієї причини залежність рівня сигналу від частоти, отриманого з його допомогою, називається псевдоспектром.

Як приклади на рис. 4 і 5 наведено результати обробки реальних сигналів від кораблів ПКР та ОС.

На графіках рис. 4, а та 5, а наведено реалізації залежності зміни середньозваженої доплерівської частоти від часу, а на графіках рис. 4, б та 5, б — результати спектральної обробки цих залежностей, отримані за допомогою швидкого перетворення Фур'є. За цими графіками важко однозначно визначити середні періоди коливань кораблів. Водночас графіки псевдоспектрів цих же сигналів (рис. 4, в і 5, в), отримані за допо-

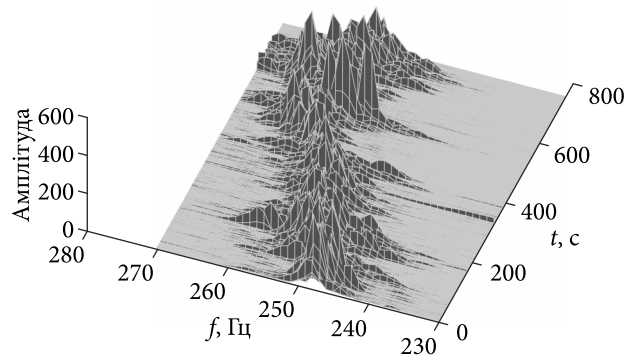


Рис. 3. Приклад спектрограми доплерівського сигналу, відбитого кораблем

могою методу MUSIC, дають можливість однозначно визначити періоди коливань. Результати обчислень середніх періодів бортової хитавиці кораблів при різних курсових кутах і дальностях наведено в табл. 3.

У табл. 4 наведено порівняльні значення періодів бортової хитавиці для кораблів, отримані

Таблиця 3. Середні періоди бортової хитавиці кораблів при різних курсових кутах та дальностях

№ з/п	ОС		ПКР	
	Дальність	$\bar{T}_B$	Дальність	$\bar{T}_B$
1	2000	7.5	4000	20
2	2500	7.3	6250	17
3	2750	8.3	8000	16
4	3100	7.6	9000	17
5	3300	5.0	9500	20
6	3500	7.14	9600	20
7	3750	6.9	10000	20
8	4000	6.8	10500	17
9	4600	7.97	11000	25
10	4800	6.9	11500	23
11	5100	7.8	12000	25
12	5300	7.5	12800	26
13	5500	7.1	13000	26

Таблиця 4. Середні значення періодів хитавиці ПКР та ОС

Тип корабля	Середній період бортової хитавиці $\bar{T}_B$, с		Дисперсія періодів бортової хитавиці (експеримент)
	розрахунок	експеримент	
ПКР	19.2	21.0	12.5
ОС	7.2	7.2	0.3

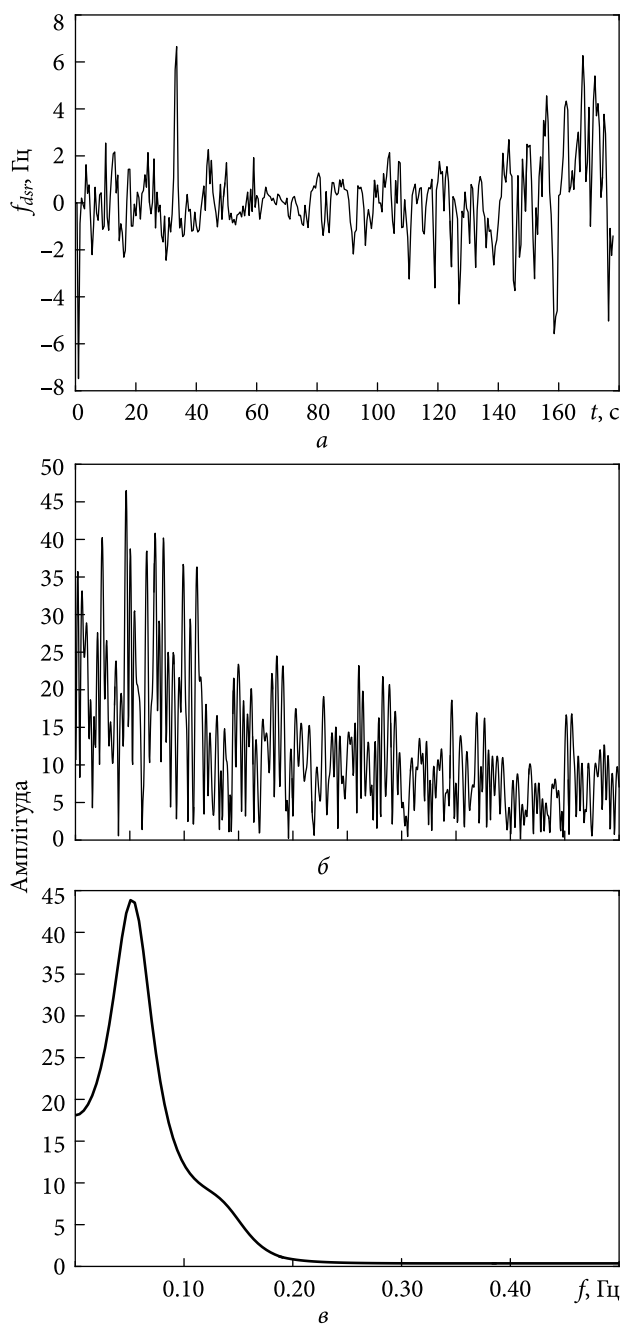


Рис. 4. Результати обробки сигналів від ПКР: часова реалізація середньозваженої доплерівської частоти (а), миттєвий спектр (б) та псевдоспектр (в) цієї часової реалізації

розрахунковим шляхом, а також та середні значення періодів бортової хитавиці, отримані за весь час експерименту, та їх дисперсія.

З табл. 4 видно, що експериментальні значення середнього періоду бортової хитавиці є близькими до розрахункових. Це підтверджує обґрунтованість припущень про наявність у спектрі

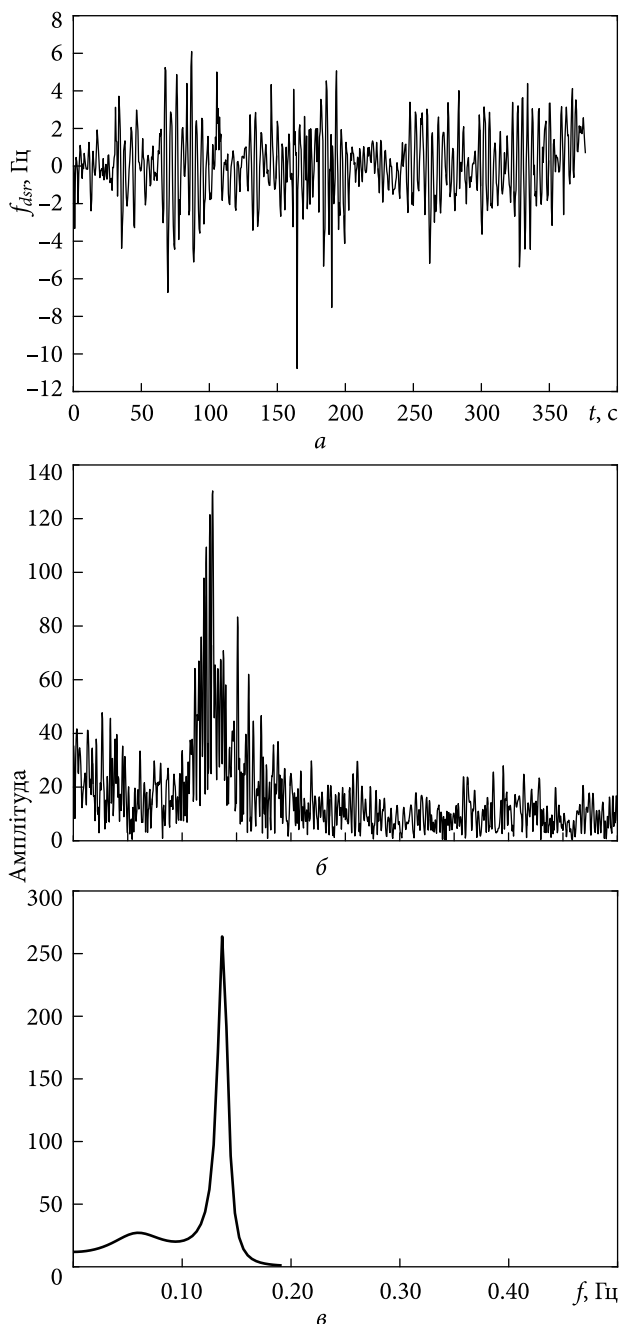


Рис. 5. Результати обробки сигналів від ОС: часова реалізація середньозваженої доплерівської частоти (а), миттєвий спектр (б) та псевдоспектр (в) цієї часової реалізації

сигналу, розсіяного кораблем, частот, які відповідають частотам коливань корабля на морському хвилюванні.

Для ПКР спостерігається велике значення дисперсії, що свідчить про невисоку точність визначення періоду бортової хитавиці. Це пояснюється тим, що на період хитавиці впливає багато

факторів, які важко врахувати при дистанційному визначенні цього параметра.

Насамперед на величину дисперсії періодів хитавиці впливають труднощі врахування стану морської поверхні в зоні експерименту (бальність, напрямок хвиль тощо). У проведених вимірюваннях цей фактор міг мати велике значення, оскільки вимірювання здійснювалися в береговій зоні, а хвильова обстановка на відстані 2 і 15 км значно відрізняється.

Другим важливим фактором є вплив метацентричної висоти на період хитавиці. Цей параметр залежить не тільки від конструкції корабля, але й від його завантаження. Наприклад, для ПКР метацентрична висота може змінюватися від 0.87 до 2.2 м; при цьому період власних бортових коливань змінюється від 24 до 16 с.

Зважаючи на те, що габаритні розміри ПКР значно перевищують габарити ОС, вплив морського хвилювання на нього значно менший. Отже, й амплітуда хитавиці ПКР значно менша за амплітуду хитавиці ОС, що також впливає на точність визначення періоду хитавиці ПКР.

Тим не менш, дистанційне вимірювання періоду може бути використане для визначення класу

кораблів під час їх розпізнавання, коли габарити та водотоннажність їх значно відрізняються.

Висновки

У роботі було проведено розрахунки та експериментальні дослідження хитавиці двох кораблів, які значно відрізняються габаритами, за умов морського хвилювання.

Основні результати роботи:

- на основі теорії хитавиці корабля розроблено методику визначення періоду хитавиці корабля, яка ґрунтується на використанні послідовності миттєвих спектрів сигналів, відбитих від корабля, із застосуванням когерентної РЛС;
- здійснено порівняльний аналіз періодів хитавиці, розрахованих з використанням гідродинамічної теорії, з періодами, отриманими в натурному експерименті на основі запропонованого методу, який виявив добрий збіг результатів для двох кораблів різного типу;
- обґрунтовано можливість використання періоду бортової хитавиці, отриманого шляхом спектрального аналізу відбитого кораблем сигналу, як додаткової ознаки для його розпізнавання.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. *Radar handbook*. Editor-In-Chief M.L. Sknik. 1970. McGraw-Hill Book Company.
2. Remez Yu.V. *Ship pitching*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 328 с.
3. Горобець В.М., Гутнік В.Г., Зотов С.М., Ківва Ф.В., Шапіро О.А. Математична модель радіолокаційного образу корабля на морському хвилюванні. *Радіофізика та електроніка*. 2011. Т. 2(16), № 4. С. 60—65.
4. Ferreira Garcia R., Antonio C., Ameal F. Ship Stability Monitoring by Motion Frequency Analysis. *IFAC Proceedings Volumes*. 2001. Vol. 34, Iss. 7. P. 39—43. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)35056-5
5. Perez T., Blanke M. Ship Roll Motion Control. *Proc. of 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*. Elsevier. 2010.
6. *Ship Theory Handbook*. Vol. 2. Voithounski Y.I. ed. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 440 с.
7. Горобець В.М., Синицький В.Б., Хоменко С.І. Дослідження поширення радіохвиль сантиметрового діапазону над морем із використанням високопотенційної доплерівської РЛС. *Радіофізика та електроніка*. 2021. Т. 26, № 1. С. 12—19. DOI: 10.15407/rej2021.01.012
8. Горобець В.М. Доплерівські спектри вузькосмугових сигналів, відбитих кораблями різних класів. *Радіофізика та електроніка*. 2012. Т. 3(17), № 3. С. 35—40.
9. Lighthill M.J. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 2001. 504 p.
10. Marple S.L.Jr. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Publ. 1987. 492 p.
11. Proakis J.G., Manolakis D.G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Prentice Hall, 2007.

Стаття надійшла 18.02.2025

REFERENCES

1. Sknik, M.L. ed., 1970. *Radar handbook*. McGraw-Hill Book Company.
2. Remez, Yu.V., 1983. *Ship pitching*. Leningrad, Sudostroenie Publ.
3. Gorobets, V.M., Gutnik, V.G., Zotov, S.M., Kivva, F.V., Shapiro, A.A., 2011. Mathematical model of the radar image of the ship on sea. *Radiophys. Electron.*, **2(16)**(4), pp. 60—65.

4. Ferreiro Garcia, R., Antonio, C., Ameal, F., 2001. Ship Stability Monitoring by Motion Frequency Analysis. *IFAC Proceedings Volumes*, **34**(7), pp. 39–43. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)35056-5
5. Perez, T., Blanke, M., 2010. Ship Roll Motion Control. In: *Proc. of 8th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems*. Elsevier.
6. Voitkounski, Y.I. ed., 1985. *Ship Theory Handbook*. Vol. 2. Leningrad, Sudostroenie Publ.
7. Gorobets', V.M., Sinitsky, V.B., Khomenko, S.I., 2021. A study of microwave over- sea propagation with high-potential X-band Doppler radar. *Radiophys. Electron.*, **26**(1), pp. 12–19. DOI: 10.15407/rej2021.01.012
8. Gorobets', V.M. The Doppler spectra of microwave backscattering by ships. *Radiophys. Electron.*, **3**(17)(3), pp. 35–40.
9. Lighthill, M.J., 2001. *Waves in Fluids*. Cambridge University Press.
10. Marple, S.L. Jr., 1987. *Digital spectral analysis: with applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Publ.
11. Proakis, J.G., Manolakis, D.G., 2007. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. Prentice Hall.

Received 18.02.2025

V.N. Gorobets¹, M.I. Golovko¹, V.G. Gutnik², S.M. Zotov¹

¹ O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine

12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

² Institute of Radio Astronomy of the NAS of Ukraine

4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

RADAR DETERMINATION OF SHIP ROLL PERIOD IN ROUGH SEAS

Subject and Purpose. Understanding ship roll parameters in rough sea conditions is crucial for practical applications, such as evaluating a ship's stability or classifying a vessel type. The primary roll parameters include the amplitude and frequency (or period) of the ship's oscillations. Doppler spectra of signals reflected from sea vessels moving in turbulent waters are analyzed, aiming to determine the ship's roll period through spectral processing of signals scattered by various types of vessels in realistic marine environments.

Methods and Methodology. The study involves both mathematical calculations and full-scale experimental studies. Average ship roll periods are theoretically calculated using the hydrodynamic theory of ship roll in irregular waves. The sea wave heights in the full-scale experiment are within three to four. The ships in the study vary significantly in size and displacement. The ship roll period is determined by analysis of a sequence of instantaneous Doppler spectra of signals reflected from the ship. The mathematical calculation results are compared with the measurement outcomes.

Results. The full-scale experimental studies conducted for two vessel types at different ranges provided instantaneous spectra of Doppler signals. The average roll periods and their variances obtained during experimental data processing were compared with the theoretically calculated values. The comparison results validate the initial assumptions that the reflected signals contain frequencies associated with ship roll. The comparative study between two different ships shows a good agreement of the data.

Conclusions. The Doppler signals scattered by a moving vessel in rough sea conditions contain information whose relevant processing yields the average roll period of the ship. The possibility of remote measurements of roll periods enables addressing problems related to surface object recognition and navigation.

Keywords: radar measurements, scattering, Doppler spectrum, ship roll.