

О.Я. Луковський, І.Г. Дзевєрін, В.Д. Карлов, І.Є. Ряполов, М.В. Дудко, Ю.В. Трофименко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

РОЗРОБКА МЕТОДУ СЕЛЕКЦІЇ І ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ, МАЛОШВИДКІСНИХ НАДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ФОНІ МОРЯ

Запропоновано метод виявлення малорозмірних надводних об'єктів, що використовує інформацію про кути приходу прийнятого сигналу, особливості просторових характеристик зворотного розсіювання від моря та надводних об'єктів. Показана теоретично і підтверджена експериментально принципова можливість використання особливостей кутового шуму надводних цілей і морської поверхні, а також просторової періодичності відбиттів від моря для поліпшення радіолокаційної спостережливості малорозмірних малошвидкісних цілей.

Ключові слова: кутовий шум, малорозмірний надводний об'єкт, просторові характеристики зворотного розсіювання.

Вступ

Постановка проблеми. Перешкоди, які створюються відбиттям від схвильованої поверхні, ускладнюють радіолокаційним станціям (РЛС), а в ряді випадків унеможливають, вирішення завдань селекції та виявлення ехо-сигналів малорозмірних надводних об'єктів. Це обумовлено тим, що середнє значення ефективної площі розсіювання (ЕПР) від морської поверхні для більшості РЛС, що мають стандартні розміри елементу роздільної здатності становить одиниці квадратних метрів, зростаючи при сплесках, які створюються гребнями морських хвиль, на 10...15 дБ. Доплерівське зміщення частоти перешкодових відбиттів відповідає еквівалентним швидкостям руху розсіювачів 1...2 м/с. Малорозмірні надводні об'єкти (гумові надувні човни, баркаси, навігаційні знаки) мають ЕПР 0,5...10 м². Ще менші значення ЕПР (близько 0,05...0,15 м²) у бойових підводних плавців в момент підсплиття, яке вони проводять при підході до об'єкту, що атакується для орієнтування та прив'язки до місцевості. Швидкості переміщення таких об'єктів (плавці, човни під веслами) складають від частин до одиниць метрів на секунду.

В останні два десятиліття для прориву Державного кордону використовується тактичний прийом, що складається в проході зони суцільного засвічення (до 5...10 км в залежності від бальності хвилювання моря) під веслами з малою швидкістю, а потім відхід з великою швидкістю (до 30 вузлів) в нейтральні води. Такі швидкості відходу при хвилюваннях до 4 балів забезпечують японські гумові надувні човни з подвійним обводом типу «Кавасакі» з двома підвісними двигунами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При виявленні малорозмірних надводних об'єктів на фо-

ні перешкод від моря виникають проблеми, пов'язані з тим, що амплітуда корисного сигналу сумірна, а в ряді випадків і менше, ніж амплітуда перешкодових відбиттів, а його спектр для малошвидкісних об'єктів лежить всередині спектра відбиття від морських хвиль [1–2].

Використання спектральних і амплітудних методів селекції і виявлення при цьому стає неефективним. Експериментальні дослідження показали, що для сигналу, відбитого від моря, характерна просторова періодична структура [3]. У той же час, розміри більшості надводних об'єктів не перевищують елемент роздільної здатності радару і вони можуть розглядатися як точкові. Це вказує на можливість використання інформації щодо просторових характеристик шуму для поліпшення локаційної спостережливості об'єктів невеликого розміру на фоні відбиттів від моря.

Кутовий шум цілей зазвичай розглядають як явище, яке має негативний вплив на роботу радіолокаційних систем, знижуючи точність вимірювання координат цілей [9–10]. Однак, будучи додатковим джерелом інформації про ціль, в певних умовах, він може послужити фактором, що підвищує надійність виявлення або служити критерієм для розпізнавання об'єктів [11–12]. Наявність в імпульсному обсязі РЛС цілі призводить до появи на виході вимірювача кута постійної складової сигналу похибки, величина якої залежить від кутового зміщення цілі щодо осі антени пеленгатора. При відсутності цілі вона в середньому дорівнює нулю. Другий ефект полягає в зменшенні дисперсії флуктуацій кутової координати при появі в імпульсному обсязі компактної цілі.

Передумовою для використання кутового шуму цілі при виявленні є зміна його статистичних характеристик, коли на фоні просторово розподіленого відображення від поверхні моря з'являється компак-

тний відбивач – надводна ціль.

Таким чином, можна очікувати, що поява в елементі роздільної здатності РЛС компактної надводної цілі буде призводити до трансформації статистичних характеристик кутового шуму розсіяного морем сигналу, і цей ефект може бути покладено в основу побудови систем селекції і виявлення цілей.

Мета статті – розробка методу селекції і виявлення малорозмірних, малозшвидкісних надводних об'єктів на фоні моря.

Виклад основного матеріалу

1. Оцінка методів лінійної і нелінійної просторової (по дальності) селекції малорозмірних малозшвидкісних надводних об'єктів на фоні відбиття від моря

Для побудови просторового компенсатора можна використовувати класичний принцип порівняння сигналів, розділених деяким інтервалом часу. Однак, на відміну від систем компенсації, що використовують для порівняння сигнали, затримані на період повторення, при просторовій селекції необхідно реалізувати порівняння перешкодових сигналів всередині періоду повторення. Отже, можна назвати подібні системи, як системи з внутрішньоперіодною компенсацією. Найпростіший компенсатор може бути реалізований на просторовій лінії затримки і блоці різниці. На вхід лінії затримки сигнал надходить з пристрою, що реалізує попередню просторову обробку даних (накопичення сигналу по декільком періодам повторення). Вибором затримки τ_0 , узгодженої з просторовим періодом відображень від моря $r_0 = c\tau_0/2 = \Lambda_M$, де Λ_M - період морських хвиль, буде здійснюватися компенсація перешкодового сигналу.

Для отримання дискримінаційної характеристики можна використовувати додаткову лінію затримки і блоки різниці. Порівняння на всьому діапазоні відстаней середньої амплітуди сигналів, отриманих відніманням з незатриманого сигналу, затриманого на $\tau_0 \pm \Delta\tau$, дозволяє визначити напрямок зміни затримки, керованої лінії затримки, яка перебудовується, а $2\Delta\tau$ є часом затримки, який реалізується додатковою лінією затримки.

Просторова частотна характеристика лінійної частини компенсатора збігається з частотною характеристикою системи черезперіодною компенсації. Положення нуля просторової частотної характеристики $\chi_0 = 2\pi n/r_0$, де $n = 0, 1, \dots$, визначається просторовою затримкою r_0 , що збігається з просторовим шумовим періодом Λ_M .

Послідовне з'єднання декількох одноланкових компенсаторів дозволяє реалізувати багатоланкові

просторові компенсатори.

Перешкоди, які створюються відбиттями від моря, можуть апроксимуватись просторовим спектром $S_z(\chi)$ виду [3]:

$$S_z(\chi) = S_0 \left[1 + \left(\frac{\chi - \chi_0}{\Delta\chi} \right)^2 \right]^{-k}, \quad (1)$$

де $\chi_0, \Delta\chi, k$ – характеризують центральний зсув, ширину просторового спектру і швидкість його зменшення, відповідно.

Розрахункові значення коефіцієнтів поліпшення спостережливості, одержувані з використанням одноланкового і триланкового просторових компенсаторів для різних апроксимацій просторового спектра шуму в залежності від ширини спектра перешкодових відбиттів, коли всі ланки компенсатора налаштовані на просторовий період перешкоди, наведені на рис. 1.

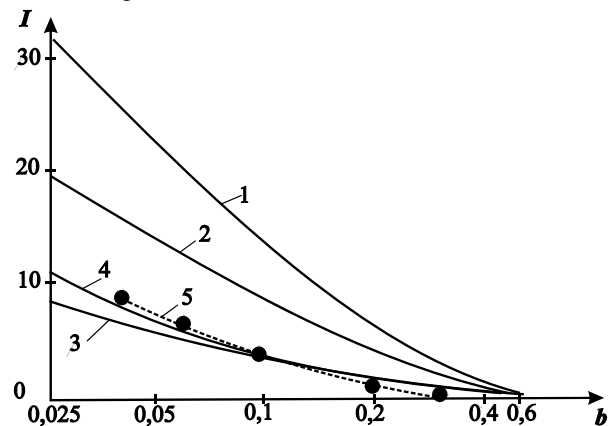


Рис. 1. Залежність поліпшення спостережливості.

Одноланковий компенсатор 2- $k=2$, 3- $k=1$;
триланковий компенсатор 1- $k=2$, 4- $k=1$

Крім того на рис. 1 показані коефіцієнти поліпшення спостережливості об'єктів на фоні моря, які отримані в машинному експерименті для одноланкового компенсатора (крива 5).

Радіолокаційне зображення морської поверхні було отримано для поверхні з просторовим спектром, який описується виразом (1) з $k=2$, перерахованим в інтенсивність зворотного розсіювання по співвідношенням, отриманим з використанням двомасштабної моделі розсіювання [4–6].

У геометро-оптичному наближенні враховувався вплив затінення вершинами хвиль, розташованими ближче до локатора можна очікувати, що застосування одноланкових просторових компенсаторів буде давати поліпшення спостережливості на 3...10 дБ об'єктів на фоні моря.

Підвищення ефективності компенсації відбиттів від моря може бути досягнуто послідовним з'єднанням декількох одноланкових компенсаторів, до складу кожного з яких входить лінія затримки, яка перебудовується. Однак такий підхід пов'язаний зі

значним ускладненням конструкції пристрою. Використання мультиплікативного об'єднання вхідних сигналів одноланкового компенсатора і двох допоміжних ліній затримки, що входять до його складу і використовуються для отримання дискримінаційної характеристики за дальністю, дозволяє реалізувати нелінійний алгоритм компенсації.

Поліпшення радіолокаційної спостережливості, що досягається з використанням нелінійних компенсаторів, по відношенню до лінійних, отримане в ході машинного експерименту, показано на рис. 2.

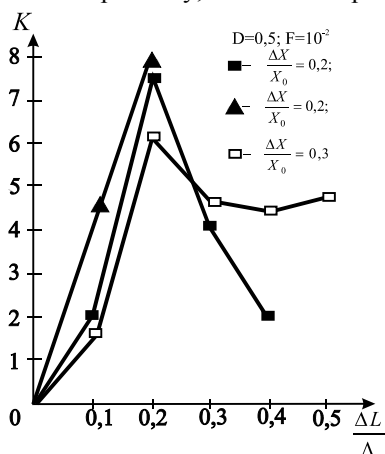


Рис. 2. Виграш в поліпшенні радарної спостережливості при використанні нелінійних алгоритмів компенсації

Для експериментальної перевірки ефективності алгоритмів просторової селекції використовувалися дані, які отримані в ході натурних експериментів на Чорному морі [7–8]. Локація морської поверхні здійснювалася радарними сантиметрових і міліметрових діапазонів хвиль. Радари сантиметрового діапазону мали такі характеристики: довжина хвилі 3 см і 2 см, імпульсна потужність випромінювання 10 кВт і 500 Вт, тривалість імпульсів 50 нс і 0,4 мкс, частота повторення імпульсів зондування 4 кГц, швидкості огляду простору в азимутальній площині 30 град/с і 8 град/с, відповідно. Ширина діаграм спрямованості антен в азимутальній площині становила 10 мрад і 50 мрад.

Радар міліметрового діапазону мав довжину хвилі 8 мм, імпульсну потужність 10 кВт, тривалість зондуючих імпульсів 66 нс, ширину діаграми спрямованості антени в азимутальній площині 10 мрад, частоту повторення імпульсів зондування 7,5 кГц, швидкість огляду простору в азимутальній площині 360 град/с. Висота розташування антен радарів становила близько 12 м відносно рівня моря.

Експерименти проводилися на Чорному морі при заворушеннях до 3 балів. Сигнал, відбитий з моря, з виходу амплітудного детектора радару був оцифрований з частотою 20 МГц (розмір елементу дозволу по дальності 7,5 м) і введений в РЛС для подальшої обробки даних.

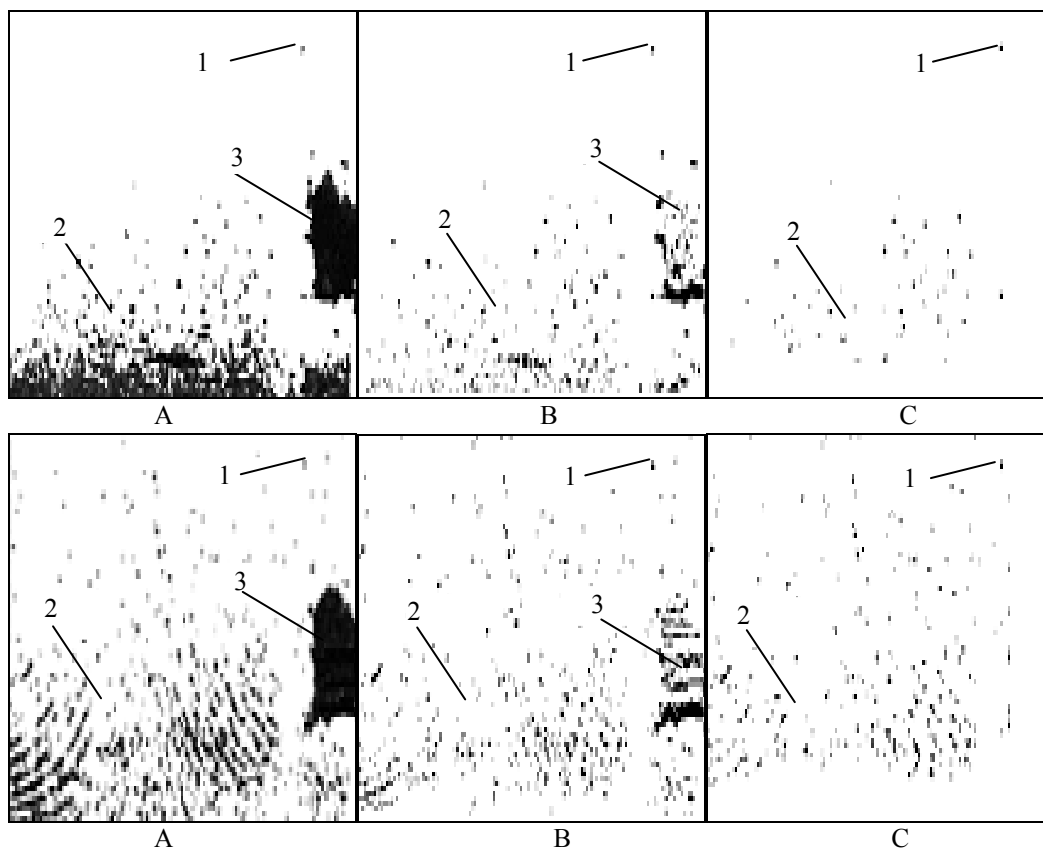


Рис. 3. Радіолокаційні зображення морської поверхні, берегової лінії і кутового відбивача: А – вхідний сигнал; В – після лінійної компенсації; С – після нелінійної компенсації; 1 – кутовий відбивач; 2 – море; 3 – берег

За експериментальними даними була оцінена ефективність лінійного та нелінійного просторових компенсаторів. На рис. 3 показані радіолокаційні зображення морської поверхні на вході і виходах лінійного та нелінійного компенсаторів. Рис. 3, а відповідає наявності на морі вітрового хвилювання близько 3 балів, а рис. 3, б – хвиль вітрової брижі, з хвилюванням близько 4 балів.

У правій частині екрану знаходиться ділянка берега. Хвилювання на морі в момент експерименту

становило близько 3 балів. Цифрою 1 позначений кутовий відбивач, розташований на плоту. Як видно, застосування просторових компенсаторів дозволяє істотно послабити відбиття від моря і берегової лінії, залишивши без зміни сигнал від надводної цілі.

Виграші за коефіцієнтами придушення перешкод від моря, а також в співвідношенні сигнал-перешкода, які одержуються з використанням лінійного та нелінійного алгоритмів просторової компенсації наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти придушення і виграші співвідношень сигнал/перешкода, які одержані при використанні методів лінійної і нелінійної просторової селекції

Швидкість вітру, м/с	Напрямок опромінення поверхні, град.	Довжина хвилі випромінювання, см.	Поляризація випромінювання та прийому	Коефіцієнт придушення, дБ		Імовірність помилкової тривоги, $F=10^{-1}$		Імовірність помилкової тривоги, $F=10^{-2}$	
				Лінійна компенс., дБ	Нелін. компенс., дБ	Лінійна компенс., дБ	Нелін. компенс., дБ	Лінійна компенс., дБ	Нелін. компенс., дБ
3	0°	3	ВП	7,2	10,7	6	14	3	3
3	0°	3	ВП	7,8	14	6	12	4	8
3	0°	3	ГП	11,7	23,1	7	13,9	–	–
3	0°	3	ГП	10,5	24,5	6	17	3,9	6,9
4	0°	3	ВП	7,2	12,1	5	10	4	6
6	0°	3	ВП	8,3	12,8	6	9,9	–	–
6	72°	3	ВП	6	9,9	4	9,9	1,4	1,9
8	0°	3	ГП	6,4	7,1	3	11	–	–
8	0°	3	ВП	4	4,9	4	17	3	4
8	0°	3	ВП	9	18,9	8	22	6	8
6	0°	0,8	ВП	3,2	3,5	8	19	2	3
9	0°	0,8	ВП	5,8	14,2	2	20,9	3	5
11	0°	0,8	ВП	3,6	5	6	22,9	3	5

Отриманий з використанням одноланкового просторового компенсатору коефіцієнт поліпшення радарної спостережливості в залежності від стану морської поверхні становить 3...11 дБ. Застосування нелінійного компенсатору дозволяє отримати додатковий виграш від 2 дБ до 10 дБ, що знаходиться в задовільному співвідношенні з теоретично очікуваними значеннями. Використання просторової періодичності відбиття від моря дозволяє поліпшити спостережливість малорозмірних маловидкісних цілей на фоні моря, тобто в тих випадках, коли інші методи селекції не ефективні.

2. Оцінка ефективності експериментальних досліджень кутових флуктуацій приходу сигналів, розсіяних надводними цілями

Експериментальне дослідження кутових флуктуацій проводилось з використанням імпульсної РЛС восьмиміліметрового діапазону хвиль. Вимірювання здійснювалися шляхом порівняння амплітуд сигналів, прийнятих по двом променям діаграми спрямованості приймальної антени, які перемика-

ються з частотою 500...1000 Гц, що дорівнює половині частоти повторення зондуючих імпульсів. Ширина парціальних діаграм за рівнем половинної потужності становила 7,3 мрад при розносі близько 3,7 мрад і крутизні пеленгаційної характеристики близько 10 мрад. Антена дозволяла вимірювати як азимутальні флуктуації кутів (при вертикальній поляризації випромінювання-прийому), так і кутомісні флуктуації (при горизонтальній поляризації) шляхом відповідного повороту системи з двох опромінювачів навколо її осі. Вимірювання охопили діапазон хвилювань до 2...3 балів.

В якості радіолокаційних цілей використовувалися гумовий надувний човен завдовжки 2,5 м з двома людьми на борту (весляр і пасажир) на дистанції від 0,3 км до 0,8 км і ряд точкових еталонних відбивачів: тригранні кутові відбивачі з ЕПР 100 м², 10 м², 1 м² і сферичний відбивач з ЕПР близько 0,1 м². Відбивач з ЕПР 100 м² був встановлений на висоті 4,5 м над водою на дальності близько 0,38 км і використовувався для калібрування РЛС. Відбивачі з ЕПР 10 м² і 1 м² встановлювалися на воді за до-

помогою плоских пінопластових поплавців (висота над поверхнею 0,1...0,15 м), а сфера - безпосередньо на воді на дистанції від 0,38 км до 1,55 км. Висота антени РЛС над рівнем моря складала близько 12 м.

В ході експерименту було встановлено, що для малорозмірних надводних цілей характерний істотно менший ніж для відбиттів від моря діапазон азимутальних флуктуацій прийнятих сигналів.

Якщо для надводної цілі середнє значення пеленга збігається з істинним напрямом на ціль і має порівняно невелику дисперсію флуктуацій, то для морської поверхні блукання кутів приходу відбитої електромагнітної хвилі спостерігається в межах всієї ділянки, що підсвічується. При зміні дальності до ділянки, що відбиває від 0,6 до 1,3 км практично не спостерігається розширення діапазону флуктуацій кутів приходу розсіяних морською поверхнею сигналів. Для квантилів розподілу від 0,1 до 0,9 діапазон флуктуацій кутів приходу, з урахуванням крутизни пеленгаційної характеристики, становить близько ± 3 мрад, тобто сумірний з шириною діаграм випромінювальної і приймаючої антенних систем. Це дозволяє стверджувати, що для відбиття від морської поверхні блукання центру, що розсіює, відбувається практично в межах плями, що сформована діаграмою передавальної антени. Разом з тим, зіста-

влення гістограм розподілу флуктуацій відображень від моря з теоретично очікуваними [10], отриманими в припущенні про формування розсіяного сигналу просторово однорідними розсіювачами, дозволяє відзначити істотно менший діапазон флуктуацій експериментально спостережуваних кутів приходу. Це, може бути пов'язано з тим, що сплески у відбитому від моря сигналі можуть формуватися досить компактно в просторі області. З цієї обставиною пов'язано і спостережуване при зміні азимута опромінення поверхні зміщення середнього значення пеленга щодо осі антеною системи. Ця обставина може бути корисною при вирішенні задач океанографії, зокрема для визначення напрямку головного бігу хвиль.

Необхідно відзначити, що крім безперервної компоненти щільності розподілу кутів приходу існує і дискретна, у вигляді набору дельта функцій на деяких напрямках, наявність якої не пояснюється статистичною мінливістю. Вона, може бути пов'язана з тим, що відбиття від морської поверхні, в ряді випадків, виступає як компактний в просторовій області об'єкт, існуюче досить тривалий час. Числові характеристики кутового шуму відбиттів від моря, які усереднені за серіями дослідів, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики кутового шуму відбиттів від надводних цілей та морської поверхні

Процес	Швидкість вітру, м/с	Азимут віднос. напрямку вітру	Дальність спостереження, км	Кількість дослідів, раз	Характеристики пеленга				
					Середньоквадратичне значення	Коефіцієнт асиметрії	Коефіцієнт ексцесу	Коефіцієнт кореляції	Кутовий розмір
море	5...6	-40...+30	0,42	4	0,31	0,15	-0,31	0,12	-
море	4	-30...+30	0,43	4	0,3	0,11	-0,54	0,08	-
море	1...2	0	0,8...1,3	4	0,22	0,22	1	0,21	-
куток з ЕПР 10 м ²	4	-	0,38	2	0,093	-3	49,5	0,31	-
човен гумовий	0	0...360	0,45...0,5	8	0,26	0,29	1,08	0,085	0,2...0,4
човен	3,5	0...360	0,5...0,53	8	0,35	0,43	0,28	0,18	0,3...0,7
корабель	4	135...270	8,8...9,2	4	0,125	-0,03	1,8	0,24	-
корабель + поглинач	4	135...270	8,8...9,2	3	0,093	0,64	1,31	0,03	-
баркас	2	45	0,7	1	0,38	0,22	-0,17	0,008	-

Для всіх дослідів гістограми розподілу кутів приходу були досить симетричні (значення коефіцієнтів асиметрії від 0,11 до 0,22) і мали невеликі значення коефіцієнтів ексцесу. Це означає, що безперервна компонента щільності розподілу кутів приходу може апроксимуватись нормальним законом.

Необхідно відзначити слабку кореляцію амплітуди і пеленга розсіяного морем сигналу. Значення коефіцієнта кореляції не перевищували 0,3. Середньоквадратичне значення пеленга відбиттів від моря мало величину 0,2...0,3.

В спектрах флуктуацій пеленгу та амплітуди розсіяного морем сигналу спостерігаються дискретні лінії, відповідні гармонікам енергонесучої частоти морського хвилювання, причому в спектрах флуктуацій пеленгу більшою мірою, ніж для амплітуд розсіяного сигналу підкреслена друга гармоніка.

Для точкових надводних цілей характерні істотно менші, ніж для морської поверхні, значення розкиду кутів приходу відносно істинного напрямку на ціль. В діапазоні рівнів значущості від 0,1 до 0,9 вони не перевищують для кутових відбивачів

0,5 мрад. Причому слід зазначити, що зі зменшенням ЕПР точкової цілі, відбувається розширення діапазону флуктуацій кутів приходу відбитого сигналу. Це пов'язано зі зростанням впливу, в цьому випадку, на кут приходу відбиттів від моря. Для перетинів двовимірної щільності розподілу амплітуда-пеленг надводних цілей характерні ті ж особливості, які раніше відзначалися для відображень від моря: найбільші блукання кутів приходу спостерігаються в моменти зменшення сигналу, коли блукання ефективного центру розсіювання визначаються відбиттями від моря. Співставлення залежностей середньоквадратичного значення флуктуацій пеленгу сигналів, розсіяних гумовим надувним човном з двома веслярами і дерев'яним човном, від азимутального кута спостереження зі зміною його спостережуваних кутових розмірів дозволяє відзначити їх задовільну відповідність.

Середньоквадратичне значення флуктуацій кутів приходу розсіяних малорозмірними цілями сигналів становить 0,5...0,7 від їх кутового розміру. Приблизно таку ж величину має середньоквадратичне значення кутів приходу щодо кутового розміру для протяжних цілей (кораблів, тоннажністю близько 2000 т). У ряді дослідів з кораблем точки, що відбивають, закривалися за допомогою радіопоглинаючих матеріалів. Однак це не приводило до істотного зниження ЕПР і діапазону флуктуацій кутів приходу відбитих сигналів. Для всіх типів цілей коефіцієнт асиметрії розподілів кутів приходу має невелику величину, а для малорозмірних надводних цілей, невеликі і коефіцієнти ексцесу. Це означає, що розподіл кутів приходу для них буде задовільно апроксимуватись гауссівською щільністю. Для значних надводних цілей коефіцієнт ексцесу розподілу кутів приходу має велику величину, що пов'язано з наявністю стабільних блискучих точок.

Результуючі характеристики кутового шуму відображень від надводних цілей наведені в табл. 2.

Необхідно відзначити, що для всіх типів надводних цілей, так як і для відбиттів від морської поверхні, характерна слабка кореляція амплітуди і кутів приходу розсіяного сигналу. Спектри флуктуацій азимутального пеленгу точкових надводних відбивачів є вузькосмуговими. Основна енергія зосереджена в смузі до 1 Гц на декількох дискретних частотах, кратних частоті енергонесучого максимуму морського хвилювання (0,25...0,35 Гц для тих умов, в яких були проведені експерименти). На частотах понад 1 Гц відбувається спадання спектральної щільності за степеневим законом зі швидкістю, яка спостерігається і в амплітудних спектрах. Енергети-

чні спектри флуктуацій пеленгу складної цілі (надувний човен з екіпажем) більш широкосмугові, їх енергійна область простягається до частот 2...3 Гц. Встановлені відмінності в статистичних характеристиках флуктуацій пеленгу надводних цілей і морської поверхні можуть служити додатковим критерієм для побудови систем розпізнавання і виявлення.

Висновки

Підвищення ефективності компенсації відбиттів від моря може бути досягнуто послідовним з'єднанням декількох одноланкових компенсаторів, до складу кожного з яких входить лінія затримки, яка перебудовується. Однак такий підхід пов'язаний зі значним ускладненням конструкції пристрою.

В статті розроблено метод селекції і виявлення малорозмірних, малошвидкісних надводних об'єктів на фоні моря за рахунок використання мультиплікативного об'єднання вхідних сигналів одноланкового компенсатора і двох допоміжних ліній затримки, що входять до його складу і використовуються для отримання дискримінаційної характеристики за дальністю, дозволяє реалізувати нелінійний алгоритм компенсації.

Оцінена ефективність лінійного та нелінійного просторових компенсаторів. Застосування просторових компенсаторів дозволяє істотно послабити відбиття від моря і берегової лінії, залишивши без зміни сигнал від надводної цілі.

Отриманий з використанням одноланкового просторового компенсатора коефіцієнт поліпшення радарної спостережливості в залежності від стану морської поверхні становить 3...11 дБ.

Застосування нелінійного компенсатора дозволяє отримати додатковий вигравш від 2 дБ до 10 дБ, що знаходиться в задовільному співвідношенні з теоретично очікуваними значеннями.

Використання просторової періодичності відбиття від моря дозволяє поліпшити спостережливість малорозмірних малошвидкісних цілей на фоні моря, тобто в тих випадках, коли інші методи селекції не ефективні.

Встановлені особливості просторової структури і кутів приходу зворотного розсіювання від моря малорозмірних надводних цілей можуть служити основою для створення систем селекції і виявлення.

Застосування лінійних і нелінійних просторових за дальністю і кутах приходу компенсаторів в радіолокаторах сантиметрового і міліметрового діапазонів хвиль може забезпечити поліпшення радіолокаційної спостережливості цілей від 5 дБ до 25 дБ в залежності від стану морської поверхні.

Список літератури

1. Kirichenko V.A. A Technique to Improve the Surface Ship Detectability by Incoherent Scatter Radars / V.A. Kirichenko, V.I. Lutsenko // Telecommunications and radio engineering. – 2001. – Т. 55. – № 10-11. – Р. 86-99.

2. Луценко В.И. Экспериментальное изучение информативных признаков надводных целей / В.И. Луценко, С.И. Хоменко // Труды 5 МНТК «Радиолокация, навигация и связь», Воронеж, 20-23 апреля 1999г. – 1999. – Т. 2. – С. 1132-1142.
3. Загородников А.А. Радиолокационная съемка морского волнения с летательных аппаратов / А.А. Загородников. – Л.: Гидрометеиздат. – 1978. – 239 с.
4. Басс Ф.Г. Рассеяние радиоволн на статистически неровной поверхности / Ф.Г. Басс, И.М. Фукс. – М.: Наука, 1972. – 424 с.
5. Филипс О.М. Динамика верхнего слоя океана / О.М. Филипс. – М.: Мир, 1969. – 265 с.
6. Влияние структуры морской поверхности на пространственные характеристики рассеянного ею излучения / А.И. Калмыков, И.Е. Островский, А.Д. Розенберг, И.М. Фукс // Изв. вузов. Радиофизика – 1965. – № 6. – С. 1117-1127.
7. Lutsenko V.I. Filtering methods for a small-size vessels observation against the sea background / V.I. Lutsenko, K. Ivanyuk, A. Nazarov // Millennium Conference on Antennas & Propagation AP2000 ESA SP-444 Proceedings, 9-14 April 2000, Davos, Switzerland, ESA Publications Division ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Dorothea Danesy & Huguette Sawaya, Proceedings (CD-ROM).
8. Roenko A.N. An application on Nonlinear Spatial Filtration Method for Improving the Small Observation on the Sea Clutter Background / A.N. Roenko, V.I. Lutsenko // MSMW'2001 Symposium proceedings Physics and Engineering of Millimeter and Sub - Millimeter Waves, Kharkov, Ukraine, June 4-9, 2001. – 2001. – № 1. – P. 411-413.
9. Костенко Н.Л. Пространственная корреляция нормалей к фазовым фронтам / Н.Л. Костенко, Р.В. Островитянов, Е.В. Чаевский // Украинский физический журнал. – 1971. – Т. 16, № 10. – С. 1717-1721.
10. Островитянов Р.В. Статистическая теория радиолокации протяженных объектов / Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь. – 1982. – 232 с.
11. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – М.: Сов. Радио. – 1970. – 392 с.
12. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов. – М.: Радио и связь. – 1984. – 312 с.

References

1. Kirichenko, V.A. and Lutsenko, V.I. (2001), A Technique to Improve the Surface Ship Detectability by Incoherent Scatter Radars, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 55, No. 10-11, pp. 86-99.
2. Lutsenko, V.Y. and Khomenko, S.Y. (1999), “Eksperymentalnoe yzuchenye ynformatyvnykh pryznakov nadvodnykh tselei” [Experimental study of informative features of surface targets], *Trudy 5 MNTK “Radyolokatsiya navyhatsyia y sviaz”*, vol. 2, pp. 1132-1142.
3. Zahorodnykov, A.A. (1978), “Radyolokatsyonnaia semka morskoho volnnyia s letatelnykh apparatov” [Radar survey of sea waves from aircraft], *Hydrometeoizdat, Lenynhrad*, 239 p.
4. Bass, F.H. and Fuks, Y.M. (1972), “Rasseianyie radyovoln na statystychesky nerovnoi poverkhnosti” [Radio wave scattering on a statistically uneven surface], *Nauka, Moscow*, 424 p.
5. Fylyps, O.M. (1969), “Dynamyka verkhneho sloia okeana” [Ocean dynamics of top layer], *Myr, Moscow*, 265 p.
6. Kalmykov, A.Y., Ostrovskiy, Y.E., Rozenberh, A.D. and Fuks, Y.M. (1965), “Vlyianyie struktury morskoi poverkhnosti na prostranstvennye kharakterystyky rasseiannoho eiu yzluchenyia” [The influence of the structure of the sea surface on the spatial characteristics of the radiation scattered by it], *Radiophysics*, No. 6, pp. 1117-1127.
7. Lutsenko, V.I., Ivanyuk, K. and Nazarov, A. (2000), Filtering methods for a small-size vessels observation against the sea background, *Millennium Conference on Antennas & Propagation AP2000 ESA SP-444 Proceedings, 9-14 April 2000, Davos, Switzerland*, ESA Publications Division ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, Dorothea Danesy & Huguette Sawaya, Proceedings (CD-ROM).
8. Roenko, A.N. and Lutsenko, V.I. (2001), An application on Nonlinear Spatial Filtration Method for Improving the Small Observation on the Sea Clutter Background, *MSMW'2001 Symposium proceedings Physics and Engineering of Millimeter and Sub - Millimeter Waves*, No. 1, Kharkiv, Ukraine, pp. 411-413.
9. Kostenko, N.L., Ostrovtyianov, R.V. and Chaevskiy, E.V. (1971), “Prostranstvennaia korreliatsyia normalei k fazovym frontam” [Spatial correlation of normals to phase fronts], *Ukrainian Physical Journal*, No. 10, pp. 1717-1721.
10. Ostrovtyianov, R.V. and Basalov, F.A. (1982), “Statystycheskaia teoryia radyolokatsyy protiazhennykh obektov” [Statistical theory of radar of extended objects], *Radio and Communication, Moscow*, 232 p.
11. Leonov, A.Y. and Fomychev, K.Y. (1970), “Monoympulsnaia radyolokatsyia” [Monopulse radar], *Soviet Radio, Moscow*, 392 p.
12. Leonov, A.Y. (1984), “Monoympulsnaia radyolokatsyia” [Monopulse radar], *Soviet Radio, Moscow*, 312 p.

Надійшла до редколегії 08.07.2019

Схвалена до друку 10.09.2019

Відомості про авторів:

Луковський Олег Ярославович

науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9906-2652>

Дзевєрін Ігор Григорович

кандидат військових наук старший науковий співробітник
начальник наукового центру Повітряних Сил Харківського
національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4121-2099>

Information about the authors:

Oleh Lukovskiy

Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9906-2652>

Igor Dzeverin

Candidate of Military Sciences Senior Research
Chief of Scientific Center of Air Force
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4121-2099>

Карлов Володимир Дмитрович

доктор технічних наук професор
завідувач кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>

Ряполов Іван Євгенович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3139-1644>

Дудко Марина Валеріївна

науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2010-1779>

Трофименко Юрій Валентинович

науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6651-793X>

Volodymyr Karlov

Doctor of Technical Sciences Professor
Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-1043-684X>

Ivan Ryapolov

Candidate of Technical Sciences
Senior Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3139-1644>

Maryna Dudko

Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2010-1779>

Yurii Trofymenko

Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6651-793X>

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА СЕЛЕКЦИИ И ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ,
МАЛОСКОРОСТНЫХ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ МОРЯ**

О.Я. Луковский, И.Г. Дзеве́рин, В.Д. Карлов, И.Е. Ряполов, М.В. Дудко, Ю.В. Трофименко

Предложен метод обнаружения малоразмерных надводных объектов, использующий информацию об углах приема принятого сигнала, особенности пространственных характеристик обратного рассеяния от моря и надводных объектов. Показана теоретически и подтверждена экспериментально принципиальная возможность использования особенностей углового шума надводных целей и морской поверхности, а также пространственной периодичности отражений от моря для улучшения радиолокационной наблюдаемости малоразмерных малоскоростных целей.

Ключевые слова: *угловой шум, малоразмерный надводный объект, пространственные характеристики обратного рассеяния.*

**DEVELOPMENT OF THE METHOD OF SELECTION AND DETECTION OF SMALL,
SMALL-SPEED LATERAL OBJECTS ON THE BACKGROUND OF THE SEA**

O. Lukovsky, I. Dzeverin, V. Karlov, I. Ryapolov, M. Dudko, Yu. Trofymenko

A method for the detection of small surface objects using the information about the angles of arrival of the received signal, the spatial characteristics of the backscattering from the sea and surface objects is proposed. The theoretical possibility of using the features of the angular noise of surface targets and the sea surface, as well as the spatial periodicity of reflections from the sea to improve the radar observability of small-sized low-speed targets, has been shown theoretically and experimentally confirmed. Increasing the efficiency of offshore compensation can be achieved by sequentially connecting several single-line compensators, each of which includes a delay line that is being rebuilt. However, this approach is associated with a significant complication of the design of the device. The method of selection and detection of small, low-speed surface objects against the background of the sea is developed by the use of multiplicative combination of input signals of a single-line compensator and two auxiliary delay lines, which are part of it and are used to obtain discriminatory characteristics in the range, allows to realize a nonlinear compensation also rhythm. The efficiency of linear and non-linear spatial compensators is evaluated. The use of simple compensators can significantly reduce the reflection from the sea and the coastline, leaving unchanged signal from the surface target. Obtained using a single-line spatial compensator, the coefficient of improvement of radar surveillance, depending on the state of the sea surface is 3...11 dB. The use of a non-linear compensator allows to obtain an additional gain of 2 dB to 10 dB, which is in a satisfactory ratio with theoretically expected values. The use of the spatial periodicity of beating from the sea improves the observability of small-scale low-speed targets against the background of the sea, in cases where other methods breeding is not effective. The established features of the spatial structure and angles of arrival of scattering from the sea of small surface targets can serve as a basis for the creation of systems of selection and detection. The use of linear and non-linear spacecraft on the range and angles of arrival of the compensators in radars of centimeter and millimeter wavelengths can improve the radar tracking of targets from 5 dB to 25 dB, depending on the state of the sea surface.

Keywords: *angular noise, small surface object, spatial characteristics of backscattering.*