

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Миронов Володимир Олександрович

УДК 621.396.96

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЗАВАД ВІД МОРСЬКОЇ ПОВЕРХНІ
Й НЕОДНОРІДНОСТЕЙ ТРОПОСФЕРИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ
ПРИСТРОЇВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Проблема забезпечення безпечного судноводіння в умовах обмеженої видимості й у складних метеоумовах належить до однієї з найбільш затребуваних завдань сучасної навігації. При цьому використанню радіолокаційних засобів немає альтернатив, тому що виявлення й вимірювання координат надводних об'єктів здійснюється за допомогою сучасних навігаційних РЛС досить надійне навіть під час відсутності оптичної видимості.

Однак пасивні завади у вигляді відбиттів від схвильованої морської поверхні (МП) і оптично неспостережуваних об'єктів – “ангел-ехо” (АЕ) маскують корисні сигнали й погіршують ефективність навігаційних РЛС. Тому розробка методів зниження рівня пасивних завад є досить актуальним завданням.

Необхідною умовою для вирішення зазначеного завдання є наявність інформації про характеристики пасивних завад, чому присвячено багато робіт, у тому числі в Україні. При цьому необхідно відзначити дослідження, виконані в ІРЕ НАН України (В. Б. Разказовський, Г. П. Кульомін, Ф. В. Ківва, С. І. Хоменко та ін.), у НДІ “Квант” (В.П. Гузь, Н. В. Хоменко), у МГІ НАН України (В. А. Пустовойтенко), у Національному технічному університеті, м. Севастополь (Л. Ф. Лобкова).

У той же час такі характеристики, як викиди сигналів, відбитих від схвильованої МП, які дають значний внесок у загальну завадову обстановку, вивчені недостатньо, включаючи спектрально-часові характеристики викидів сигналів, особливо при використанні РЛС із високою роздільною здатністю при ковзних кутах опромінення, а також характеристики АЕ. Тому існуючі моделі розсіювання радіохвиль МП і АЕ істотно розходяться з результатами натурних вимірювань, що знижує ефективність алгоритмів обробки сигналів, що базуються на цих моделях. У цьому зв'язку проведення експериментальних досліджень зазначених пасивних завад є необхідним етапом для уточнення існуючих і розробки нових моделей розсіювання радіохвиль для оптимізації алгоритмів обробки сигналів навігаційних РЛС.

Тому актуальною є тема дисертаційної роботи, що присвячена експериментальному дослідженню характеристик сигналів, відбитих від схвильованої МП і АЕ, а також удосконаленню методів обробки сигналів для поліпшення характеристик виявлення й супроводу надводних об'єктів за допомогою навігаційних РЛС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження тісно пов'язані з виконанням планових НДР: “Обробка сигналів корабельної трикоординатної РЛС S і K_U діапазонів” (№ ГР 0102V003732, 2001 – 2002 р.), проведеної НДІ “Квант РЛ” (м. Київ), а також “Дослідження й розробка активно-пасивних методів моніторингу навколишнього середовища” (№ГР 0107U001080, 2006-2011), проведеної ІРЕ НАН України, у яких автор дисертації був співвиконавцем.

Мети й завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка й уточнення моделей просторово-часових і спектральних характеристик пасивних завад у вигляді відбиттів радіохвиль від схвильованої МП під ковзними кутами опромінення й АЕ на основі експериментальних досліджень відбитих сигналів у широкому діапазоні робочих частот.

Для цього в дисертації сформульовані й вирішені **наступні завдання:**

- розроблено і створено багаточастотний радіолокаційний вимірювальний комплекс для проведення натурних досліджень просторово-часових і спектральних характеристик пасивних завад;
- проведено синхронні експериментальні дослідження просторово-часових і спектральних характеристик сигналів, відбитих від МП і АЕ на різних частотах і при ковзних кутах опромінення;
- проведено експериментальні дослідження виявлення морських цілей для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів виявлення корисних сигналів на тлі пасивних завад;
- проведено уточнення існуючих моделей розсіювання сигналів, відбитих від схвильованої МП моря й АЕ;
- розроблено нові й удосконалені існуючі алгоритми виявлення надводних цілей шляхом компенсації пасивних завад;
- розроблено і створено спеціалізований радар-процесор у складі штатної навігаційної РЛС на основі запропонованих алгоритмів виявлення корисних сигналів на тлі пасивних завад.

Об'єкт дослідження – явище розсіювання радіолокаційних сигналів морською поверхнею й неоднорідностями тропосфери.

Предмет дослідження – просторово-часові й спектральні характеристики сигналів, відбитих від МП і АЕ, при зондуванні в широкому діапазоні частот при ковзних кутах опромінення.

Методи дослідження. При проведенні дисертаційних досліджень використовувалися основні положення теорії поширення й розсіювання радіохвиль, теорії радіолокації, теорії випадкових процесів і математичної статистики, теорії планування експерименту, а також математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- уперше проведено синхронні вимірювання просторово-часових і спектральних характеристик викидів сигналів РЛС із високою роздільною здатністю, відбитих від схвильованої МП у різних діапазонах довжин хвиль ($\lambda = 2 \text{ см}, 3,2 \text{ см}$ і 10 см) і при ковзних кутах опромінення, що дозволило уточнити існуючі моделі розсіювання радіохвиль залежно від ракурсу спостереження й стану МП;
- уперше проведено синхронні вимірювання просторово-часових і спектральних характеристик сигналів АЕ в різних діапазонах довжин хвиль ($\lambda = 2 \text{ см}, 3,2 \text{ см}$ і 10 см) й отримано дані про частоту появи, траєкторії руху й характеристики АЕ, що дозволило запропонувати алгоритм обробки відбитих сигналів, що розділяє внесок відбиттів від МП і АЕ;

- завдяки проведеним дослідженням набув подальшого розвитку метод виявлення корисних сигналів на тлі відбиттів від МП на основі роздільного прийняття рішення по окремих частинах пачки відбитих сигналів і адаптивної зміни граничного рівня залежно від інтенсивності хвилювання моря й положення променя антени щодо напрямку бігу морських хвиль.

Практичне значення отриманих результатів визначається наступним:

- отримані результати досліджень просторово-часових і спектральних характеристик сигналів, відбитих від схвильованої МП у різних діапазонах довжин хвиль, використані для розробки алгоритмів обробки сигналів у морських навігаційних РЛС;

- проведені вимірювання просторово-часових і спектральних характеристик сигналів 2-сантиметрового діапазону, відбитих від схвильованої МП, викликають значний інтерес у зв'язку з зазначеними раніше перевагами цього діапазону при загоризонтному виявленні надводних об'єктів;

- результати експериментальних досліджень використані при розробці адаптивного алгоритму подавлення пасивних завад у вигляді відбиттів від МП з різною інтенсивністю морських хвиль і орієнтацією променя антени РЛС щодо напрямку їхнього руху;

- запропонований адаптивний алгоритм виявлення цілей на фоні пасивних завад реалізований у спеціалізованому радарі-процесорі в складі штатної навігаційної РЛС "Вайгач", випробування якого по малорозмірним морським цілям підтвердило подавлення пасивних завад від МП на 4÷15 дБ залежно від його інтенсивності;

- спосіб поліпшення характеристик виявлення корисних сигналів у навігаційних РЛС підтверджений свідченням про пропозицію № 529 від 11.09.2009м і впроваджений у штатних навігаційних РЛС у лабораторії вимірювальної техніки Чорноморського Флоту Російської Федерації (акт впровадження № 529 від 11.09.09 р).

Особистий внесок здобувача. Оpubліковані роботи [1, 2, 4, 5, 7 і 8] написані без співавторів, зокрема в [1, 2, 4 і 5] наведені результати експериментальних вимірювань просторово-часових і спектральних характеристик пасивних завад залежно від умов спостереження й довжини радіохвиль, в [7, 8] наведені результати натурних випробувань і аналіз характеристик виявлення радіолокаційних сигналів залежно від кількості імпульсів у пачці й умов поширення радіохвиль.

У роботах, опублікованих у співавторстві [3, 6], внесок здобувача полягає в наступному: автором створено експериментальну установку, проведено вимірювання, оброблено й узагальнено дані про розподіл АЕ по координатах, швидкості руху й величині ЕПР, а також обчислено характерні траєкторії їхнього руху.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях і симпозіумах: «Сучасні й перспективні системи радіолокації,

радіоастрономії й супутниковій навігації» (Харків, 2008); «Сучасні проблеми радіотехніки й телекомунікацій» (Севастополь, 2008); XLIX Всеросійська міжвузівська науково-технічна конференція (Владивосток, 2006); «Сучасні проблеми радіотехніки й телекомунікацій» (Севастополь, 2010).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 4-х статтях у вітчизняних науково-технічних журналах, які включені до переліку ВАК України, а також в 4-х тезах доповідей на науково-технічних конференціях.

Структура й обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел з 109 найменувань і додатку. Повний обсяг роботи становить 189 сторінок, у тому числі: 51 рисунок (з них рисунки на окремих сторінках займають 30 сторінок), 22 таблиці, список використаних джерел на 10 сторінках і додаток на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі показано актуальність досліджень, сформульовано мету, об'єкт і завдання дослідження, обґрунтовано наукову новизну й практичну цінність отриманих результатів, а також описано структура дисертації.

У першому розділі аналізуються раніше проведені дослідження, обговорюються існуючі моделі розсіювання радіолокаційних сигналів від МП і АЕ. Показано, що проблема математичного опису процесу розсіювання радіохвиль схвильованої МП на ковзних кутах опромінення й неоднорідностями тропосфери настільки складна, що найбільш вірогідним джерелом інформації про характеристики відбитих сигналів є експериментальні дослідження й статистичні методи обробки їхніх результатів.

Численні теоретичні й експериментальні дослідження привели до створення в 1960-1970 рр. двомасштабної моделі розсіювання радіохвиль морською поверхнею у вигляді брижі, накладеної на великомасштабну хвильову структуру, що широко використовується при оцінці характеристик відбитих сигналів. Подальші роботи, що проводилися в 1970-80 рр., були пов'язані з уточненням і адаптацією двомасштабної моделі для реальних умов морського хвилювання.

У другому розділі описано розроблену радіолокаційну апаратуру й методику проведення натурних експериментів на південно-східному узбережжі Чорного моря в діапазонах довжин хвиль із $\lambda = 2$ см, $\lambda = 3,2$ см і $\lambda = 10$ см. Розроблена апаратура містить у собі цифрові пристрої для запису й обробки радіолокаційної інформації у вигляді радара-процесора на базі швидкодіючого 12-розрядного АЦП ЛАН-10 USB з тактовою частотою до 100 МГц, що дозволило провести детальні дослідження просторово-часових і спектральних характеристик відбитих сигналів.

Вимірювальна РЛС у діапазоні $\lambda = 2$ см виготовлена на базі РЛС «Ініціатива-2К» з параметрами: $P_{\text{имп}} = 86$ кВт; $\tau_{\text{имп}} = 0,35$ мкс; $f_{\text{пов}} = 1875$ Гц;

чутливість приймача ≥ 112 дБ; $\Delta f_{\text{упч}} = 6$ МГц; $K_U \geq 32$ дБ; ширина діаграми спрямованості (ДС) у горизонтальній площині $ДС_{\Gamma} \leq 1,6^{\circ}$.

Вимірювальна РЛС в діапазоні $\lambda = 3,2$ см розроблена на базі корабельної навігаційної РЛС «Вайгач» з параметрами: $P_{\text{имп}} = 23$ кВт; $\tau_{\text{имп}} = 0,07$ мкс; $f_{\text{пов}} = 1560$ Гц; чутливість приймача ≥ 110 дБ; $\Delta f_{\text{упч}} = 6$ МГц; $K_U \geq 42$ дБ; ширина $ДС_{\Gamma} \leq 10$.

Вимірювальна РЛС у діапазоні $\lambda = 10$ см створена на базі корабельного радара «Фрегат» з параметрами: $P_{\text{имп}} = 65$ кВт; $\tau_{\text{имп}} = 35/0,1$ мкс; $f_{\text{пов}} = 1000$ Гц; чутливість приймача ≥ 112 дБ; $\Delta f_{\text{упч}} = 10$ МГц; $K_U \geq 48$ дБ; ширина $ДС_{\Gamma} \leq 1,8^{\circ}$.

Вимірювальні РЛС розташовувалися на відстані 100 м від берегової смуги, висота установки антен становить ~ 21 м, а глибини в досліджуваній акваторії мають межі 70...100 м, що дозволяє екстраполювати отримані результати на відкрите море. Розміри хвильового басейну утворені береговою смугою: у північно-східному напрямку довжина становить ~ 40 км (вітри переважно з листопада по лютий), а в південному й південно-західному напрямку – не менше 70 км (вітри з березня по травень і у вересні).

У третьому розділі описані результати експериментальних досліджень просторово-часових і спектральних характеристик викидів сигналів, відбитих від схвильованої МП і АЕ. Зокрема, на рис. 1 представлені результати досліджень розподілу числа викидів у вигляді гістограм з різними значеннями нормованого порогу виявлення C , виміряні при хвилюванні моря 2, 3 і 5 балів.

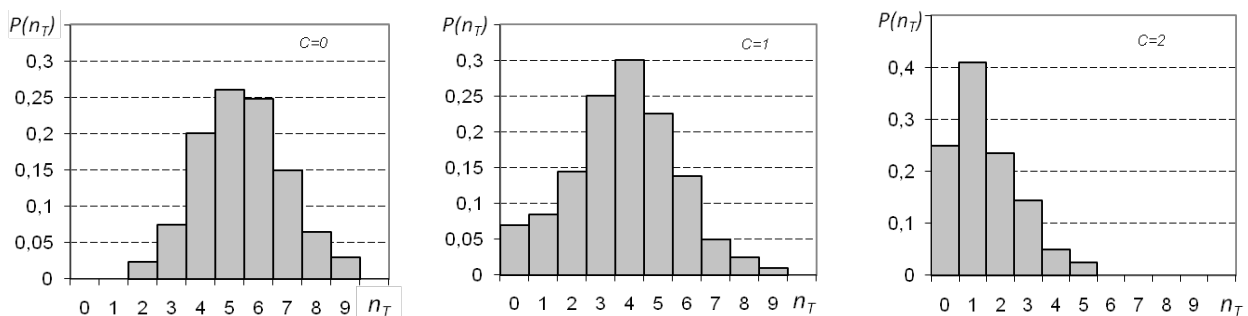
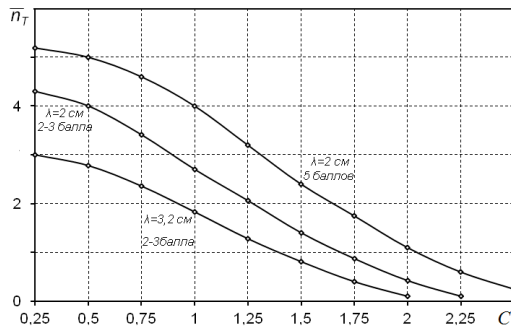
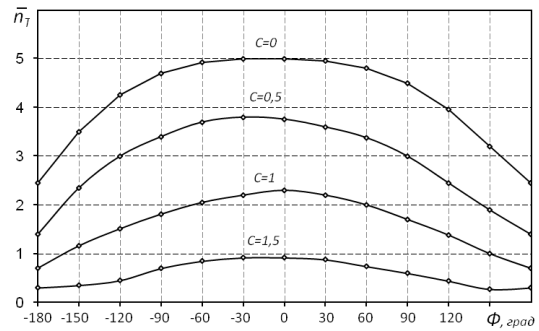


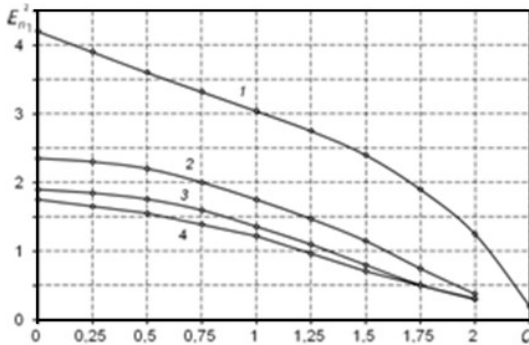
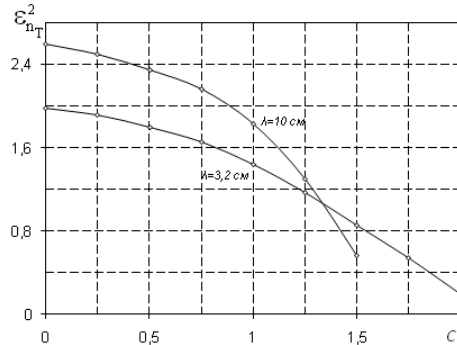
Рис. 1. Розподіл числа викидів при різних значеннях порогу C ($\lambda = 2$ см)

Середня кількість викидів збільшується зі збільшенням хвилювання моря, а при збільшенні порогу C – зменшується, причому при низьких граничних рівнях розподіл симетричний щодо середнього значення \bar{n}_T й близький до гауссового закону, а зі збільшенням нормованого порогу C гістограми зміщуються у бік менших значень \bar{n}_T , у той час як сам розподіл прямує до закону Пуассона.

На рис. 2 наведені залежності середнього значення числа викидів \bar{n}_T і їхньої дисперсії $\varepsilon_{n_0}^2$ залежно від порогу C , хвилювання моря й робочої довжини хвилі λ , які показують, що в діапазоні радіохвиль $\lambda = 2$ см збільшення хвилювання моря від 2 до 5 балів призводить до збільшення середньої кількості викидів в 1,2 рази ($C = 0,5$) і вдвічі – при $C \geq 2$. Таким чином, зі збільшенням інтенсивності хвилювання моря середня кількість викидів збільшується, хоча й ненабагато.

Рис. 2. Число викидів від порога C Рис. 3. Число викидів від кута Φ

Залежність кількості викидів \bar{n}_T від кута Φ між напрямком випромінювання радіохвиль і бігу морських хвиль з різними рівнями порогу C (рис. 3) показує, що середня кількість викидів істотно залежить від кута спостереження, причому максимальне значення спостерігається при опроміненні назустріч морським хвилям. На рис. 4 (1 – $\Phi = 180^\circ$, 2 – $\Phi = 90^\circ$, 3 – $\Phi = 30^\circ$, 4 – $\Phi = 0^\circ$) наведені залежності дисперсії числа викидів $\varepsilon_{n_T}^2$ від рівня порогу при різній орієнтації випромінювання й бігу морських хвиль, які

Рис. 4. Дисперсія викидів від порогу C Рис. 5. Дисперсія викидів $\lambda = 3,2 \text{ см}; 10 \text{ см}$

підтверджують зменшення дисперсії кількості викидів при будь-якому напрямку морських хвиль зі збільшенням порогу C , причому максимальне значення спостерігається при напрямку випромінювання проти бігу морських хвиль. Подібні вимірювання проведені також у діапазонах $\lambda = 3,2 \text{ см}$ і $\lambda = 10 \text{ см}$ – рис. 5, які показують, що при низьких порогах C відношення дисперсій у діапазонах $\lambda = 10 \text{ см}$ і $\lambda = 3,2 \text{ см}$ дорівнює $\approx 1,3$, приймаючи значення < 1 при досить значних C .

Залежності середньої кількості викидів від дальності на довжині хвилі $\lambda = 2 \text{ см}$ й при хвилюванні моря 2–3 і 5 балів представлені на рис. 6, звідки видно, що на малих дальностях \bar{n}_T мало змінюється при збільшенні хвилювання до 5 балів. Однак зі збільшенням дальності \bar{n}_T зменшується значно швидше при хвилюванні 2–3 бали, ніж при хвилюванні 5 балів.

У розділі також представлені експериментальні дослідження тривалості викидів у діапазонах $\lambda = 2 \text{ см}$, $\lambda = 3,2 \text{ см}$ від порога C для різних значень кута Φ . На рис. 7 наведені залежності густини ймовірності тривалості викидів з різними граничними рівнями і напрямку випромінювання проти морських хвиль

(хвилювання моря 2-3 бали). Як видно, збільшення порогу зміщує гістограми у бік менших значень тривалості

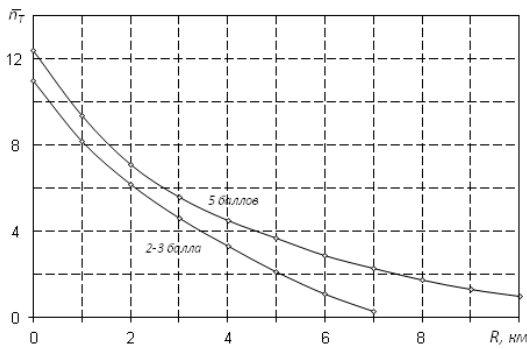


Рис. 6. Число викидів від дальності

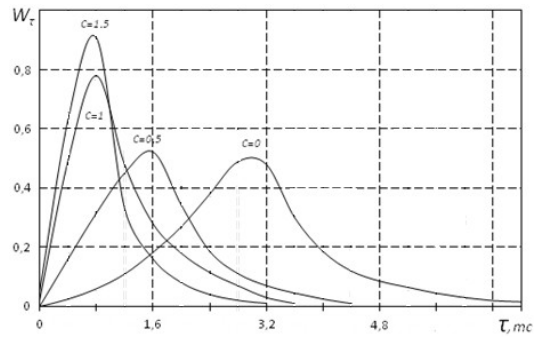


Рис. 7. Імовірність тривалості викидів

викидів, причому зменшення найбільш виражене при опроміненні навздогін бігу морських хвиль.

На рис. 8 представлені графіки залежності середньої тривалості викидів $\bar{\tau}$ з різними граничними рівнями, а на рис. 9 – залежності дисперсії ε_T^2 тривалості викидів від рівня порога C при різних кутах опромінення ($\lambda = 2 \text{ см}$) і хвилюванні моря 2–3 бали.

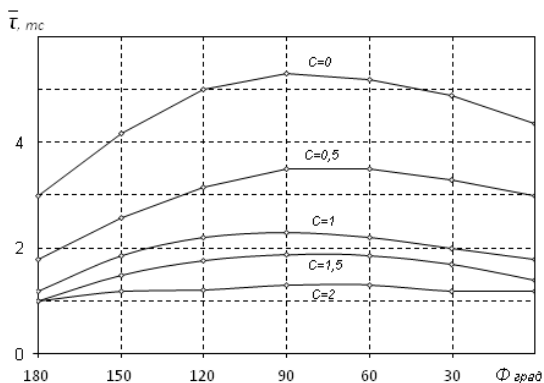


Рис. 8. Тривалість викидів від кута Φ

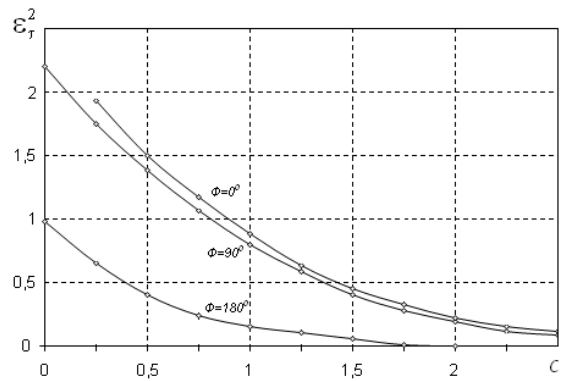


Рис. 9. Дисперсія тривалості викидів

У другому підрозділі наводяться результати дослідження спектральних характеристик сигналів, відбитих від МП у діапазонах $\lambda = 3,2 \text{ см}$ і $\lambda = 10 \text{ см}$, приклад яких рис. 10 виміряний при кутах опромінення $\Phi_1 = 0^\circ$, $\Phi_2 = 30^\circ$ ($R = 3 \text{ км}$, хвилювання 3–4 бали), а повний каталог спектрограм наведений у додатку. Крім того, зміна кута опромінення Φ зміщує максимум спектра рис. 11 і розширює його смугу на рівні -3 дБ від 40 Гц до 110 Гц при збільшенні хвилювання моря від 2 до 6 балів.

Експерименти при $\lambda = 3,2 \text{ см}$ показують, що зміна хвилювання від 3 до 5 балів майже не впливає на спектр відбитих сигналів, а істотні зміни спостерігаються в моменти обвалення гребенів морських хвиль. При хвилюванні 5-6 балів на дальності 15 км і напрямку опромінення проти бігу хвиль ширина спектра становить 150...200 Гц (на рівні -20 дБ), а центральна частота на 120...150 Гц більше, ніж при хвилюванні 3-4 бали.

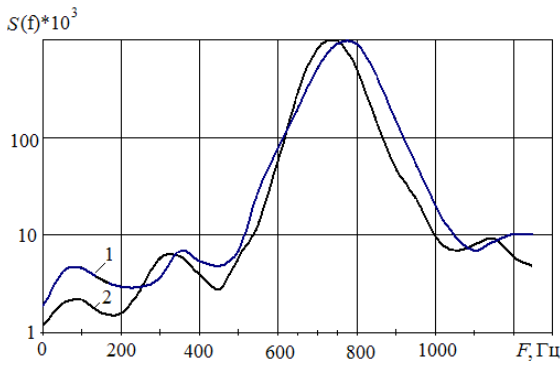


Рис.10. Приклад спектра
(1- $\Phi_1=0^\circ$, 2- $\Phi_2=30^\circ$)

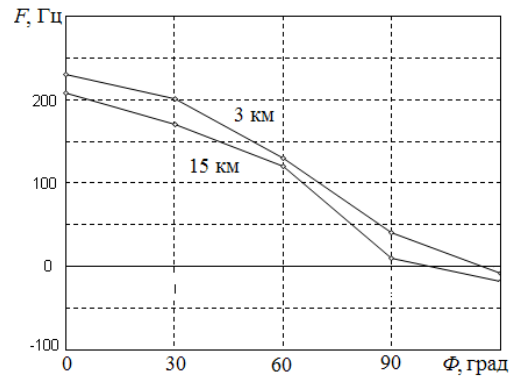


Рис. 11. Допплерівський зсув від кута Φ

У розділі також представлені дослідження відбиттів від АЕ, які включають різні види тропосферних неоднорідностей. На рис. 12а наведено приклад РЛ зображення АЕ над сушею, а на рис. 12б – над МП.

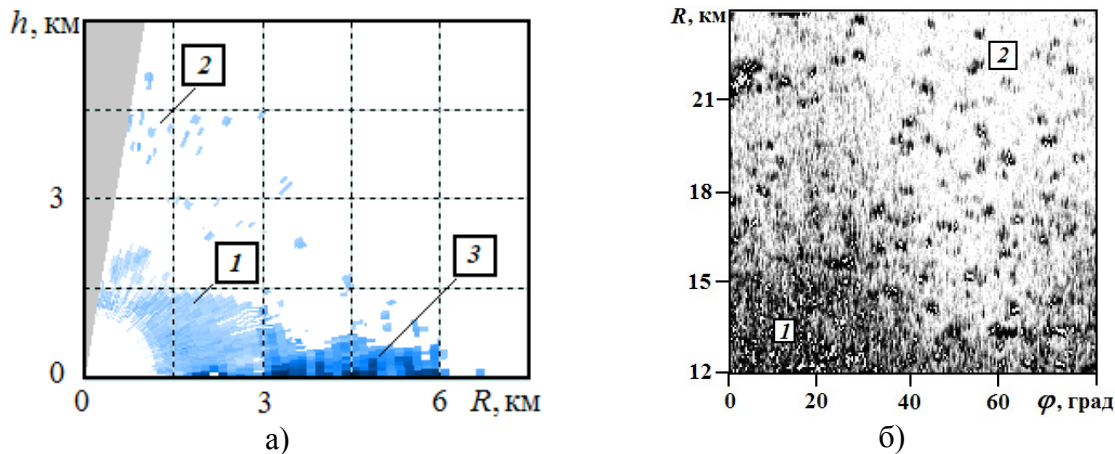


Рис. 13. Приклади РЛ зображення АЕ $\lambda = 3,2$ см: над сушею – а), над морем – б)

Область безперервного засвічення 1 (рис. 12а) зумовлена брегівським розсіюванням, дискретні оцінки 2 відповідають відбиттям від конвективних комірок, а відбиття 3 при малих кутах місця – зумовлені місцевими предметами.

Аналіз отриманих даних свідчить про те, що АЕ розподілені за висотою в діапазоні 0-6 км, швидкістю 0-40 м/с, а їх ЕПР змінюється в діапазоні від часток см^2 до 0,1 м^2 , що порівняно з ефективною площею розсіювання малорозмірних цілей. Час життя АЕ становить десятки-сотні секунд, а їхній рух має характер однаково спрямований, збіжний з напрямком вітру, а також різноспрямований із протилежними або пересічними напрямками руху в різних ешелонах по висоті. Тому сигнали від АЕ мають великий розкид по доплерівській частоті, характерний для швидкісних цілей (1...2 кГц), причому найбільша кількість АЕ спостерігалась на відстані 10...15 км від берегової смуги в ранкові й вечірні години, а вдень ця відстань збільшувалася до 20...25 км. Регулярні спостереження показали, що АЕ у вигляді конвективних комірок над морською поверхнею існують практично протягом усього року при різних метеорологічних умовах і стані моря. Відзначено, що в період найбільш

активної тропосфери (квітень і жовтень) імовірність спостереження АЕ дуже висока, спадаючи в осінньо-зимовий сезон. Крім того, кількість АЕ і їхня інтенсивність залежать від умов проходження радіохвиль на трасі поширення: більш високому градієнту атмосферної рефракції відповідає більша густина й інтенсивність АЕ на одиницю площі. Найбільша тривалість існування АЕ спостерігається в теплі безвітряні дні й досягає 4...5 хв., у той час, як при вітряній погоді час існування може скорочуватися до десятків секунд.

Характеристики спектра АЕ мають велике значення для розробки систем селекції корисних сигналів, проте, як показують вимірювання, відрізняються великою мінливістю й нестаціонарністю. У результаті вимірювань отримані значення середньої доплерівської частоти $\bar{F}_a = 1399,5 \pm 258$ (середня швидкість $\bar{V} = 22,4 \pm 4,1$ м/с) і ширини доплерівського спектра на різних рівнях (середньоквадратична ширина на рівні -3 дБ дорівнює $\Delta F_a = 59,4 \pm 40,9$). При цьому порівняння даних у діапазоні $\lambda = 10$ см і $\lambda = 3,2$ см показало, що значення їх доплерівської частоти залежить не лише (і не тільки) від робочого діапазону частот і швидкості вітру. У першу чергу, це пояснюється обертальним характером руху повітряних мас у конвективній комірці, що добре помітно при використанні квадратурної обробки відбитих сигналів. У цьому випадку сигнал від АЕ розпадається на два доплерівських спектра, які розташовані симетрично щодо нульових доплерівських частот і відповідають протилежно обертовим частинам вихору. Крім того, як показує досвід спостереження АЕ, помітний внесок у значення доплерівської частоти дають висхідні (спадні) руху, у яких бере участь конвективна комірка.

Четвертий розділ присвячений використанню результатів наукових досліджень для розробки пристроїв обробки відбитих сигналів морських навігаційних РЛС. Запропоновано й описано два алгоритми обробки сигналів для селекції цілей на тлі пасивних завад, які розроблені в результаті досліджень викидів сигналів, відбитих від схвильованої поверхні моря. Обидва алгоритми програмно реалізовані в спеціально розробленому радарі-процесорі й випробувані в складі штатної навігаційної РЛС "Вайгач".

Для проведення натурних вимірювань ефективності запропонованих алгоритмів використовувалася малорозмірна морська ціль у вигляді гідрографічного катера з еталонним значенням ЕПР, рівним 100 м^2 , що рухався різними галсами в прибережній акваторії. При цьому відносний кут опромінення поверхні моря (кут між віссю променя антени й бігом морських хвиль) становив $\Phi = 5$ кут. град. (назустріч бігу хвиль) і $\Phi = 83$ кут. град. (поперек бігу хвиль).

Алгоритм селекції корисних сигналів на тлі відбиттів від МП із адаптивним порогом ураховує азимутальну залежність викидів сигналів, відбитих від МП і дозволяє істотно знизити рівень завад (на 5-15 дБ), як показано на рис. 14, де наведені приклади РЛ зображення з монітора навігаційної РЛС без використання радара-процесора – рис. 14а й після обробки сигналів із застосуванням радар процесора – рис. 14б (хвилювання 3-4 бали).

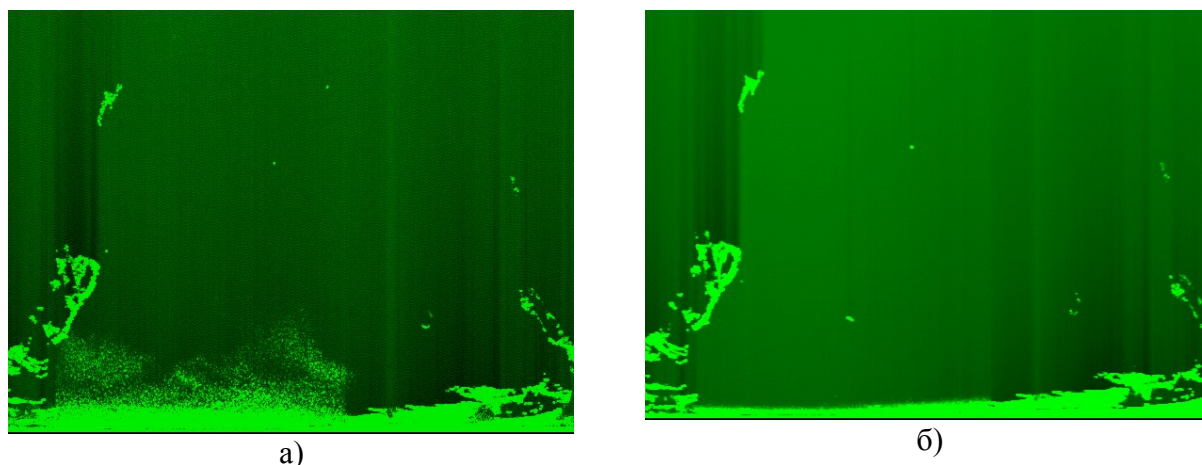


Рис. 14. РЛ зображення застосування радара-процесора до -а) і після -б)

Крім того, запропонований і реалізований алгоритм обробки сигналів з використанням даних про густину розподілу тривалості викидів сигналів від МП. Пачка імпульсів, що складається з 15 посилок, ділиться на три рівних сегменти, кожний з яких обробляється окремо з використанням логіки «3 з 5», а потім результат первинної обробки у вигляді трьох послідовностей обробляється на основі логіки «2 з 3».

У результаті проведення натурних випробувань показано, що застосування розробленого алгоритму забезпечило збільшення дальності впевненого виявлення малорозмірної морської цілі на 31% (імовірність виявлення 0,9), причому характеристики виявлення практично не залежать від відносного кута опромінення.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання побудови уточнених моделей просторово-часових і спектральних характеристик пасивних завад у вигляді відбиттів радіохвиль від схвильованої МП під кутами опромінення й АЕ на основі результатів експериментальних досліджень у різних діапазонах довжин хвиль ($\lambda = 2 \text{ см}$, $3,2 \text{ см}$ і 10 см). Це дало можливість удосконалити алгоритми обробки сигналів навігаційних РЛС і забезпечити поліпшення характеристик виявлення цілей за наявності зазначених пасивних завад. Основні результати полягають у наступному:

1. Для проведення експериментальних досліджень просторово-часових і спектральних характеристик сигналів пасивних завад у вигляді відбиттів від МП і АЕ, розроблено і створено багаточастотний вимірювальний комплекс, що містить у собі вимірювальні РЛС із цифровою реєстрацією й обробкою сигналів у діапазонах $\lambda = 2 \text{ см}$, $\lambda = 3,2 \text{ см}$ і $\lambda = 10 \text{ см}$, а також пристрою цифрової реєстрації й обробки сигналів. У діапазоні $\lambda = 10 \text{ см}$ комплекс забезпечує проведення вимірювань характеристик пасивних завад з високим просторовим розрізненням за рахунок стиснення імпульсу ($\Delta R = 15 \text{ м}$) у когерентному й некогерентному режимах, а в діапазонах $\lambda = 2 \text{ см}$ і $\lambda = 3,2 \text{ см}$ – у некогерентному режимі.

2. Розроблено й реалізовано методики проведення натурних досліджень пасивних завад від схвильованої МП, вимірювання ймовірності виявлення надводних цілей, а також виділення сигналів, розсіяних АЕ на тлі відбиттів від МП за допомогою електронного сканування багатопроменевої діаграми спрямованості антени РЛС «Фрегат-МА» за кутом місця.

3. Проведено експериментальні дослідження характеристик сигналів, відбитих від схвильованого МП, і АЕ за допомогою розробленого вимірювального комплексу, включаючи:

3.1. Характеристики розподілу викидів сигналів, відбитих від МП, включаючи кількість викидів, їхню тривалість і інтервал між викидами. Показано, що:

- вид розподілу залежить від кута між променем РЛС і напрямком бігу хвиль, а також від дальності;

- при низьких значеннях порога C розподіл числа викидів симетричний щодо середнього значення й близький до гауссового закону, а зі збільшенням порога - прямує до закону Пуассона;

- при низькому рівні порога C дисперсія кількості викидів мало залежить від хвилювання моря, а зі збільшенням граничного рівня $C \geq 2$, дисперсія викидів зростає (при хвилюванні 5 балів дисперсія приблизно в чотири рази більше, ніж при хвилюванні 2 бали);

- при низькому порозі C середня кількість викидів сигналів у діапазоні $\lambda = 10 \text{ см}$ приблизно в 1,5 рази більше, ніж у діапазоні $\lambda = 3,2 \text{ см}$, а їхні гістограми зміщені у бік більших значень кількості викидів;

- на малих дальностях середня кількість викидів практично не залежить від хвилювання моря в діапазоні 2-5 балів. Зі збільшенням дальності кількість викидів зменшується значно швидше при хвилюванні 2-3 бали, ніж при хвилюванні 5 балів, що варто враховувати при регулюванні швидкості зміни напруги ВАРУ;

- при низькому порозі середня тривалість викидів при опроміненні уздовж морських хвиль в 1,8 рази більша, ніж услід морським хвилям, і в 1,3 рази більше, ніж при опроміненні проти морських хвиль для однієї й тієї самої інтенсивності хвилювання моря 2-3 бали;

- тривалість викидів у діапазоні $\lambda = 3,2 \text{ см}$ помітно перевищує відповідні значення в діапазоні $\lambda = 2 \text{ см}$ для всіх значень порогу. Крім того, для малих значень порогу дисперсія тривалості викидів також істотно більша в діапазоні $\lambda = 3,2 \text{ см}$;

- при малих кутах ковзання виявлено ефект стійких викидів, котрий полягає в появі повільно флюктуючих викидів. У діапазоні $\lambda = 2 \text{ см}$ стійкі викиди краще спостерігаються при опроміненні проти бігу морських хвиль і при горизонтальній поляризації.

3.2 У результаті дослідження характеристик доплерівського спектра сигналів, відбитих від МП, показано, що:

- ширина доплерівського спектра флуктуацій сигналів практично не залежить від кута опромінення й від дальності, при цьому ширина спектра на рівні -3 дБ дорівнює приблизно $\Delta f = 120 \dots 130$ Гц;

- у діапазоні радіохвиль $\lambda = 3,2$ см і при зміні інтенсивності хвилювання моря від 3-5 балів характеристики спектрів сигналів, відбитих від МП, практично не змінюються. Істотне збільшення центральної частоти й ширини спектрів зі збільшенням інтенсивності хвилювання спостерігається тільки в моменти обвалення гребенів морських хвиль. При хвилюванні моря 5 – 6 балів на дальності 15 км і напрямку опромінення проти бігу морських хвиль ширина спектра дорівнює $\Delta f = 150 \dots 200$ Гц (на рівні – 20 дБ), а центральна частота на 120...150 Гц більше, ніж аналогічні характеристики, отримані в умовах сталого хвилювання моря з інтенсивністю 3-4 бали;

- у діапазоні $\lambda = 10$ см спостерігається зсув максимуму спектра, розширення його смуги й спотворення форми зі збільшенням інтенсивності хвилювання моря: при зміні хвилювання моря від 2 до 6 балів ширина спектра на рівні – 3 дБ збільшується від 40 Гц до 110 Гц;

- запропоновано й досліджено двокомпонентну модель спектра морського хвилювання, у якій “енергоносіна” частина (від 0 ÷ -10 дБ) апроксимована гауссовою моделлю, а “крила” спектра – степеневою залежністю, знайдено параметри переходу від однієї моделі до іншої при зміні хвилювання й дальності.

3.3 Досліджено характеристики сигналів АЕ й показано, що:

- великий розкид по частоті Доплера 1...2 кГц погіршує ефективність традиційних методів селекції рухомих цілей;

- для селекції корисних сигналів викликає інтерес використання ширини спектра; доплерівського зсуву частоти; часу існування; виду траєкторії руху й розходжень в ЕПР;

- кількість АЕ й потужність відбитого сигналу зменшуються зі збільшенням кута місця, найбільша кількість АЕ спостерігається на відстані 10...15 км від берегової смуги в ранкові й вечірні години, а вдень ця відстань збільшується до 20...25 км;

- сигнали від АЕ розподілені в широкому діапазоні висот – 0÷6 км і швидкостей 0÷40 м/с, а значення ЕПР – від 0,1 см² до 0,1 м². Час існування становить 10-100 с, а переміщення АЕ умовно відповідають траєкторіям:

- хаотичне;

- однаково спрямоване;

- збіжне з напрямком вітру;

- різноспрямоване;

- АЕ спостерігаються найчастіше в період активної тропосфери (із квітня по жовтень) і менш часто – в осінньо-зимовий сезон. Кількість і інтенсивність АЕ залежать від умов проходження радіосигналів на трасі поширення: більш високому градієнту атмосферної рефракції відповідають більш високі густина АЕ і їхня інтенсивність. Найбільша тривалість існування

АЕ спостерігається в теплі безвітряні дні, досягаючи 4...5 хв., у той час як при вітряній погоді час існування скорочується до десятків секунд;

- спектри сигналів АЕ розподілені в широкій області частот, що дає змогу відрізнити їх від сигналів, розсіяних морською поверхнею. Середнє значення доплерівської частоти в діапазоні $\lambda = 10 \text{ см}$ становить приблизно 220 Гц (середня швидкість $\bar{V} = 12 \text{ м/с}$), середньоквадратичне значення ширини спектра $\approx 50 \text{ Гц}$. Спектр АЕ часто не відрізняється від спектра надводних об'єктів, що призводить до маскуванню сигналів малорозмірних цілей;

- порівняння даних, отриманих у діапазоні $\lambda = 10 \text{ см}$ і $\lambda = 3,2 \text{ см}$ показує, що значення середньої доплерівської частоти сигналів АЕ залежить не лише від робочого діапазону частот і швидкості вітру. Часто центральна частота доплерівського спектра істотно перевищує значення, яке відповідає швидкості вітру, що пояснюється обертовим рухом повітряних мас у конвективній комірці.

4. Результати проведених натурних досліджень використані для розробки алгоритмів обробки сигналів на тлі пасивних завад від моря, у тому числі:

- розроблено і виготовлено радар-процесор на основі виробу 6П-07 для навігаційної РЛС “Вайгач”, що використовувався для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів обробки відбитих сигналів;

- розроблено алгоритм обробки сигналів, відбитих від МП, з урахуванням дослідженої азимутальної залежності розподілу числа викидів. Алгоритм використовує адаптивний поріг, що змінюється залежно від кута повороту антени, що приводить до вирівнювання інтенсивності відбиттів радіолокаційного сигналу від МП за азимутом, а параметри порогу визначаються інтенсивністю хвилювання на морі й вводяться в програму процесора.

5. Для оцінки ефективності розробленого алгоритму проведено натурні вимірювання ймовірності радіолокаційного виявлення малої морської цілі у вигляді гідрографічного катера з еталонною ЕПР=100 м², що рухався різними галсами в прибережній акваторії. При цьому відносний кут опромінення поверхні моря (кут між віссю антени й бігцем морських хвиль) становив $\Phi=5$ кут. Град. (назустріч бігу хвиль) і $\Phi = 83$ кут. град. (уперек бігу хвиль);

6. У результаті натурних вимірювань характеристик виявлення малої морської цілі підтверджено ефективність розробленого алгоритму й показано, що його застосування для навігаційної РЛС “Вайгач” забезпечує збільшення дистанції впевненого виявлення надводної цілі на 31% (імовірності виявлення 0,9) і відсутність залежності ймовірності виявлення від відносного кута опромінення.

7. Результати виконаних досліджень впроваджені в штатних навігаційних РЛС у лабораторії вимірювальної техніки Чорноморського Флоту Російської Федерації (акт впровадження № 529 від 11.09.09 р.). Крім того, спосіб підвищення характеристик виявлення корисних сигналів у навігаційних РЛС для штормових умов підтверджений свідоцтвом про пропозицію № 529 від 11.09.2009 р.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Миронов В.А.* Исследование отражений от неоднородностей приводного слоя атмосферы // Материалы XLIX всероссийской межвузовской научно-технической конференции. – Владивосток: ТОВМИ. – 2006. – Том 1. – С. 282–290.

2. *Миронов В.А.* Экспериментальные исследования статистических характеристик выбросов помех от морской поверхности // Материалы 4-ой международной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций». – Севастополь, 2008. – Сек.8. – С. 361.

3. *Миронов В.А., Хоменко С.И.* Исследование отражений от неоднородностей приводного слоя атмосферы // 3-й Международный радиотехнический форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». – Харьков, 2008. – Том 1, ч. 2. – С. 188–191.

4. *Миронов В. А.* Экспериментальные исследования распределения числа выбросов радиолокационного сигнала отражённого от морской поверхности // Системы обработки информации. – Харьков: ХУПС. – 2009. – Вып. 3 (77). – С.54–59.

5. *Миронов В.А.* Экспериментальные исследования спектральных характеристик сигналов, отражённых от морской поверхности // Системы управления, навигации и связи. – Киев: ЦНДИНУ. – 2009. – Вып. 1 (9). – С. 57–62.

6. *Миронов В. А., Хоменко С.И., Хлопов Г.И.* Исследование обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона неоднородностями приводного слоя атмосферы // Радиофизика и электроника. – Харьков: ИРЭ. – 2009. – Том 14, №3. – С.331–336.

7. *Миронов В.А.* Оценка оптимизации обработки радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций. – Севастополь: Сев. ТУ, 2010. – С. 25.

8. *Миронов В.А.* Определение характеристик обнаружения радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех в морских условиях // Системы обработки информации. – Харьков: ХУПС. – 2010. – Вып. 1. – С. 25–30.

Миронов В. О. Експериментальне дослідження просторово-часових характеристик завад від морської поверхні й неоднорідностей тропосфери для оптимізації пристроїв обробки сигналів радіотехнічних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні й телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2010.

У роботі вирішене актуальне науково-прикладне завдання побудови уточнених моделей просторово-часових і спектральних характеристик пасивних завад у вигляді відбиттів радіохвиль від схвильованої морської поверхні під ковзними кутами опромінення й неоднорідностей тропосфери («ангел-ехо») на основі результатів експериментальних досліджень у різних діапазонах частот.

Новизна наукових результатів полягає у тому, що вперше проведено синхронне вимірювання просторово-часових і спектральних характеристик викидів сигналів, відбитих від схвильованою морською поверхні та сигналів “ангел-ехо” при радіолокаційному зондуванні з високою розподільчою здатністю по дальності в різних діапазонах довжин хвиль ($\lambda=2$ см, 3,2 см і 10 см) і ковзних кутах опромінення;

Практична значимість результатів визначається тим, що результати експериментальних досліджень використані при розробці адаптивного алгоритму виявлення корисних сигналів на фоні відбиття від морських хвиль при різній їх інтенсивності і орієнтації променя антени РЛС щодо напрямку бігу морських хвиль. Ефективність алгоритму підтверджено при проведенні натурних випробуваннях із використанням навігаційної РЛС «Вайгач».

АННОТАЦІЯ

Мионов В. А. Экспериментальное исследование пространственно-временных характеристик помех от морской поверхности и неоднородностей тропосферы для оптимизации устройств обработки сигналов радиотехнических систем. Рукопис.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – Радиотехнические и телевизионные системы. – Национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2010.

В работе решена актуальная научно-прикладная задача построения уточненных моделей пространственно-временных и спектральных характеристик пассивных помех в виде отражений радиоволн от взволнованной морской поверхности под скользящими углами облучения и неоднородностей тропосферы («ангел-эхо») на основе результатов экспериментальных исследований в разных диапазонах длин волн, что дало возможность усовершенствовать алгоритмы обработки сигналов навигационных РЛС и обеспечить улучшенные характеристики обнаружения целей на фоне указанных типов пассивных помех.

Новизна научных результатов заключается в следующем:

- впервые проведены синхронные измерения пространственно-временных и спектральных характеристик выбросов сигналов, отраженных от взволнованной морской поверхности при радиолокационном зондировании с высокой разрешающей способностью по дальности в разных диапазонах длин волн ($\lambda=2$ см, 3,2 см и 10 см) и скользящих углах облучения;

- впервые проведены синхронные измерения пространственно-временных и спектральных характеристик сигналов “ангел-эхо” в разных диапазонах длин волн ($\lambda=2$ см, 3,2 см и 10 см) и предложен алгоритм обработки отраженных сигналов, позволяющий разделить вклад отражений от морской поверхности и “ангел-эхо”;

- на основе результатов исследований получил дальнейшее развитие метод обнаружения полезных сигналов на фоне пассивных помех в виде отражений от морской поверхности, который характеризуется отдельным принятием решения по отдельным частям пачки отраженных сигналов и адаптивным изменением порогового уровня.

Практическая значимость результатов определяется следующим:

- результаты экспериментальных исследований использованы при разработке адаптивного алгоритма обнаружения полезных сигналов на фоне отражений от морского волнения при различной интенсивности морских волн и ориентации луча антенны РЛС относительно направления их движения;

- проведены натурные испытания с помощью навигационной РЛС «Вайгач» и реальной цели в виде катера, которые показали, что предложенный адаптивный алгоритм обнаружения целей обеспечивает более эффективное подавление пассивных помех от морского волнения на 4÷15 дБ в зависимости от его интенсивности.

SUMMARY

Mironov V. A. Experimental study of spatio-temporal characteristics of sea clutter and tropospheric irregularities to optimize devices for signal processing of radiosystems. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.12.17 – Radio engineering and television systems. – National university of radioelectronics, Kharkov, 2010.

An actual scientific and applied problem is solved to create refined models of spatio-temporal and spectral characteristics of passive interferences in the form of backscattering from rough sea surface at sliding angles and tropospheric irregularities (“angel-echo”) on the base of experiments in various frequency bands.

The novelty of scientific results obtained is determined by performing for the first time the synchronized measurements of spatio-temporal and spectral characteristics of signals surges was performed for high range resolution radar from rough sea surface and “angel-echo” in different wavebands ($\lambda=2\text{ cm}$, $3,2\text{ cm}$ и 10 cm) and sliding angles of illumination;

The practical significance is determined by development of adaptive algorithm for useful signal detection on the background of sea clutter at various sea roughness and different orientation of antenna boresight relatively sea waves movement, gthat was design on the base of experimental study performed;

Підп. до друку 03.09.10.
Умов. друк. арк. 1,2
Зам. № 2-773

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$
Тираж 100 прим.
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.
Харків, просп. Леніна, 14