

ОГЛЯДИ. ПОЛЕМІКА. ОБМІН ДОСВІДОМ

УДК 01.04.03

МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ МАЛОРУХОМИХ ЦІЛЕЙ НА ФОНІ ІНТЕНСИВНОГО МОРСЬКОГО КЛАТЕРА

*Мрачковський О. Д., к.т.н., доцент; Правда В. І., к.т.н., професор;
Турко С. І., аспірант*

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна*

METHODS OF SMALL SLOW MOVING TARGETS DETECTION IN HEAVY SEA CLUTTER

*Mrachkovsky O., Cand. Of Sci (Technics), associate professor;
Pravda V., Cand. Of Sci (Technics), Professor; Turko S., postgraduate student
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Вступ

Однією з найскладніших проблем у сучасній радіолокації є виявлення малорозмірних малорухомих об'єктів на фоні інтенсивного морського кластера. Такі цілі (невеликі яхти, плавці, катери, веслові човни) мають низьку відбивну здатність, і сигнал, відбитий від них, не перевищує рівня сигналу, відбитого від морської поверхні (кластера). Тому радар з низькою роздільною здатністю не може виявити таку ціль. Доплерівський зсув частоти сигналів, відбитих від таких цілей, лежить в діапазоні доплерівського зсуву сигналів, відбитих від морських хвиль. Тому методи селекції доплерівських цілей (СДЦ) неефективні для виявлення таких цілей. Покращення контрасту спостереження таких цілей на тлі хвиль досягається за рахунок підвищення роздільної здатності радара, тобто використання вузьких діаграм спрямованості антен та коротких імпульсів. Але радар з високою роздільною здатністю починає розрізняти елементи морських хвиль, і структура сигналу, відбитого від моря, набуває дискретного характеру, схожого з відбиттями від малорозмірних об'єктів, що ускладнює їх виявлення. Їх характеристики починають відрізнятися від стандартного гаусового шуму, що призводить до зниження ефективності методів оптимального прийому, розроблених для гаусових шумів. Крім того, завада стає нестационарною у часі і просторі за рахунок розрізнення окремих елементів поверхні. Малорозмірні надводні об'єкти мають вертикальні розміри, порівняні з висотою морських хвиль, тому на рівень опромінюваного об'єкта полем впливають також затінення гребенями морських хвиль. Вертикальні переміщення і затінення елементами морських хвиль призводять до того, що статистики ві-

дбитого від об'єкта сигналу відрізняються від стандартних сверлінговських моделей [1].

Багато робіт присвячено розв'язку проблеми виявлення малорозмірних малорухомих цілей на фоні інтенсивного морського клатера. Методи, описані в цих роботах, можна поділити на методи, засновані на представленні амплітуди клатера випадковим процесом, та методи, що використовують властивості клатера, не пов'язані зі статистичним розподілом його амплітуди.

Метою статті є вибір ефективного методу виявлення малорозмірних малорухомих цілей на фоні морського клатера серед доступних у наявній літературі.

Огляд статистичних методів виявлення малорозмірних цілей морськими РЛС

Традиційно проблема виявлення цілей в шумах вирішується статистичними методами. Оскільки статистичні характеристики цілі і морського клатера постійно змінюються, необхідно використовувати алгоритми, що адаптуються до зміни характеристик клатера і цілі. Основною вимогою до таких алгоритмів є вимога максимізації ймовірності правильного виявлення при постійному значенні ймовірності хибної тривоги (CFAR, constant false alarm rate). Алгоритм адаптивного виявлення цілі на фоні гаусового шуму, який задовольняє CFAR властивості, було запропоновано в [2]. Для радара з високою роздільною здатністю морський клатер не є Гаусовим шумом. Більшість дослідників сходяться на тому, що статистичною моделлю морського клатера при високій роздільній здатності радара є компонована Гаусова модель, різновидом якої є К-розподіл [3]. Згідно з цією моделлю випадковий процес, яким є морський клатер, можна представити як підклас сферично інваріантних випадкових процесів (SIRP, spherically invariant random process). Такий процес є добутком двох випадкових величин – текстурі і спеклу. Експериментальне підтвердження такого представлення амплітудної статистики морського клатера можна знайти, наприклад, в [4-8]. Випадковий вектор, що представляє пачку імпульсів морського клатера, які належать одному діапазону дальності, є сферично інваріантним випадковим вектором, функція щільності ймовірності якого повністю описується вектором середніх значень, коваріаційною матрицею M та щільністю ймовірності першого порядку [9].

Запропонований в [2] для Гаусового шуму адаптивний алгоритм оцінки відношення правдоподібності було розширено для випадку сферично інваріантного випадкового процесу. В літературі алгоритм можна зустріти під назвою адаптивного лінійно-квадратичного алгоритму (ALQ, Adaptive Linear Quadratic). Формулюється алгоритм наступим чином. Нехай радар випромінює когерентну послідовність із m імпульсів. Відповідні m відбитих комплексних імпульсів можна представити у вигляді вектора

$z = [z(1), \dots, z(m)]^T$. Якщо коваріаційна матриця M відома, то ALQ детектор математично описується як:

$$\frac{\left| \left(p^H M^{-1} z \right) \right|^2}{\left(p^H M^{-1} p \right) \left(z^H M^{-1} z \right)} \underset{H0}{\overset{H1}{>}} \chi_t,$$

де p — керуючий вектор, що складається з елементів $p_i = e^{j2\pi i f_d T}$, T — період слідування імпульсів та f_d — Доплерівська частота цілі. Коваріаційна матриця M залежить від конфігурації радара та умов навколишнього середовища, і повинна бути оцінена з сусідніх комірок роздільної здатності, які не містять цілі.

В [10] було запропоновано метод нормалізованих зразків для оцінки коваріаційної матриці (NSCM, Normalized Sample Covariance Matrix), який не залежить від щільності ймовірності текстури компонованого розподілу, але залежить від структури матриці коваріації. Пізніше в [11] для оцінки коваріаційної матриці К-розподіленого клатера було запропоновано метод апроксимованої оцінки відношення правдоподібності (AML, Approximate Maximum Likelihood), який не залежить від текстури компонованого розподілу і структури коваріаційної матриці. Метод AML оцінки коваріаційної матриці також відомий в літературі під назвою метода оцінки постійної точки (FP, fixed point). В [12] метод було вдосконалено для випадку К-розподілу з інверсною гамма текстурою і перевірено на публічних експериментальних даних клатера, виміряних у водах Канади IPIX радаром [13].

В роботах [14-15] ALQ детектор з AML методом оцінки коваріаційної матриці було випробувано на публічному наборі даних радара, виміряних у водах Південної Африки [16]. В [17] було запропоновано метод використання доплерівських властивостей клатера і цілі для покращення оцінки коваріаційної матриці і перевірено на експериментальному наборі даних морського клатера і малорозмірних цілей, виміряному у водах Південно Африканської Республіки [16].

Для поліпшення якості виявлення малорозмірних цілей в морському клатері, в літературі було запропоновано методи багаторазового сканування. В [18] було запропоновано усереднення сигналу, отриманого в результаті багаторазового сканування, для пом'якшення впливу шуму (не клатера), що давало деяке покращення продуктивності. Для придушення апроксимовано Гаусових завад використовувалися процесори з високими швидкостями сканування [19-20]. В додаток до багаторазового сканування в [21] було запропоновано використовувати перетворення Радона для покращення виявлення малорозмірних цілей на фоні морського клатера.

З використанням цих методів було покращено продуктивність виявлення малорозмірних цілей на фоні реально вимірних і штучних Гаусових завад. Однак, ці роботи не концентрувалися на теоретичному аналізі адаптивного виявлення сигналу, отриманого в результаті багаторазового сканування, на фоні компоновано Гаусового клатера.

В [22] було поєднано переваги адаптивного виявлення на фоні компоновано Гаусового клатера та виявлення з використанням багаторазового сканування. Було виведено оснований на багаторазовому скануванні теоретично оптимальний, але неадаптивний детектор на основі критерія Неймана-Пірсона (MSD, multiple-scan detector). Для умов незнання щільності ймовірності було перевірено 3 адаптивні методи для оцінки коваріаційної матриці — метод зразків (SCM, sample covariance matrix), метод нормалізованих зразків (NSCM, normal sample covariance matrix) і рекурсивної оцінки максимальної правдоподібності (RMLE, recursive maximum likelihood estimation). Результати моделювання з використанням методу Монте-Карло показали, що продуктивність виявлення запропонованих методів вища, ніж при використанні методів з одним скануванням. З трьох аналізованих адаптивних методів найкращий результат було отримано з використанням RMLE. Зазначимо, що перевірки на реальних даних морського клатера не було здійснено.

В [23] було запропоновано метод просторово-часової адаптивної обробки відбитого сигналу (STAP, space-time adaptive processing) при наявності компоновано-Гаусового клатера. Алгоритм заснований на апроксимації коваріаційної матриці матрицею з нижчим рангом, який визначається з використанням двох оцінок — оцінки експоненційно вбудованого сімейства (EEF, exponentially embedded family) та оцінки мінімальної довжини опису (MDL, minimum description length). Алгоритм дає змогу зменшити розмірність коваріаційної матриці клатера, що дозволяє зменшити число вторинних даних, необхідних для досягнення достатньої продуктивності, а також зменшити вимоги до обчислювальної техніки, необхідної для реалізації детектора.

На штучно згенерованих даних було порівняно два методи виявлення малорозмірних цілей в компоновано-Гаусовому клатері з використанням запропонованого алгоритму — низькоранговий адаптивний лінійно-квадратичний детектор (LR-ALQ, low rank adaptive linear quadratic) та низькоранговий адаптивний узгоджений фільтр (LR-NAMF, low rank normalized adaptive matched filter). Більш високу продуктивність та водночас меншу обчислювальну складність на симуляції продемонстрував LR-ALQ детектор. Перевірка алгоритму на реальних даних морського клатера знову ж таки не була здійснена.

В [24] FP метод оцінки коваріаційної матриці було удосконалено за допомогою використання теплицевої матриці як ініціалізуючої. Новий метод

дістав назву T-FP. Перевірка T-FP на реальних даних [13] показала, що детектор з теплицевою ініціалізуючою матрицею має кращу продуктивність у порівнянні із звичайним FP детектором.

Для покращення швидкості обчислювання та зменшення втрат в однорідному клатері в [25] було запропоновано використовувати рекурсивний двохполюсний фільтр з відомими параметрами. В якості статистичної моделі клатера було взято розподіл Вейбула, який не завжди є адекватним представленням щільності ймовірності морського клатера, але в певному діапазоні значень формуючого параметра дає ті ж значення, що і К-розподіл. Також в межах деяких діапазонів кутів ковзання адекватно відповідає статистиці морського клатера логнормальний розподіл, алгоритм оптимального виявлення для якого було запропоновано в [26].

Огляд методів, що не потребують знання статистичного розподілу амплітуди клатера.

Спроба використати Вейвлет-перетворення для задачі виявлення малорозмірних цілей в морському клатері була здійснена в [27]. Фізичною підставою можливості використання Вейвлет-перетворення для такого класу задач є плавність перетворення, яка дозволяє аналізувати миттєві події, що породжують загальний доплеровський спектр з плином часу. Це дає змогу відрізнити спектр, сформований багатьма розсіювачами з різними швидкостями, від спектра, сформованого ціллю, оскільки спектр самого клатера не матиме того домінуючого механізму формування спектра, який має ціль. В [27] в якості материнського вейвлета було обрано вейвлет Морлета. На реальних даних було показано, що на доплерівському спектрі, сформованому з використанням вейвлет-перетворення, наявність цілі була очевидною, в той час як на аналогічному спектрі, сформованому з використанням перетворення Фур'є, зробити висновок про відсутність чи наявність цілі було неможливо. Даний приклад показує, що необхідно провести пошукову експериментально роботу по визначенню найкращого ортогонального перетворення для задач спектрального аналізу сигналів, відбитих від малорухомих малорозмірних цілей на фоні інтенсивного морського клатера з високою роздільною здатністю.

В [28] для моніторингу малорозмірних цілей було запропоновано динамічно адаптувати форму випромінюваного сигналу відповідно до ситуацій, що характеризують інтенсивний морський клатер. Ідея полягає в дизайні такого сигналу, автокореляційна функція якого має невеликі значення там, де клатер сильний, що мінімізує ефект клатера у передбачуваному місці знаходження цілі. Алгоритм здійснюється в два етапи. Спочатку оцінюються статистичні дані клатера в межах обраної комірки, а потім ця оцінка використовується для генерації фазо-модульованого сигналу для наступної передачі. Другий сигнал допомагає поліпшити відношення сигналу/шум в місці розташування цілі і тим самим поліпшити характеристи-

ки виявлення. Для дизайну фазо-модульованого сигналу із заданими кореляційними характеристиками використовується метод найменших квадратів.

Останні досягнення в області конструювання радарів із синтетичною апертурою також було використано для вирішення задач виявлення малорухомих цілей в морському клатері [29-31]. Зокрема, в роботах [30-31] комбінація радара із синтетичною апертурою з FP детектором дала багатообіцяючі теоретичні результати, які поки що не було перевірено ні на синтезованих, ні на реальних даних.

Апарат нейронних мереж також знайшов застосування в області виявлення цілей в морському клатері. На прикладі використання нейронних мереж на основі радіальних базисних функцій (RBF, radial basis functions) в [32], було показано доцільність застосування цих методів для автоматичного виявлення цілей в клатері [33]. Архітектура адаптивних нейронних мереж була успішно застосована в [34] для класифікації різних видів завад метеорологічних радіолокаторів. Для усунення морського клатера на радіолокаційних зображеннях в [35] було запропоновано використання нейронної мережі на основі багат шарового перцептрон (MLP, multilayer perceptron).

Використання для виявлення радіолокаційних цілей нейронних мереж має ряд істотних переваг. По-перше, вони можуть бути застосовані в широко поширених некогерентних РЛС. По-друге, нейронні мережі здатні реалізувати нелінійні функції передачі, які в змозі вирішити проблему розділення сигналів цілі і клатера для того, щоб знизити рівень сигналу клатера і підвищити рівень сигналу цілі. По-третє, не потрібне апріорне знання статистичного розподілу цілі і клатера та їх параметрів. Для тренування мережі необхідний лише набір зображень радарів та їх бажаний результат. І по-четверте, використання нейронних мереж не вимагає послідовності радіолокаційних зображень, як цього потребують деякі відомі методи обробки зображень. Ця перевага робить нейронну мережу на більш швидкою при обробці радіолокаційних зображень.

Інший принциповий спосіб покращення виявлення малорозмірних цілей на фоні морського клатера – використання різниці в поляризаційних властивостях цілі і клатера. Наприклад, в [36] було запропоновано метод виявлення малорозмірних цілей на фоні клатера, оснований на поляриметричній декомпозиції. Відомо, що найбільше ускладнює виявлення цілей явище сплесків (спайків) клатера, яке збільшує ймовірність хибної тривоги [37]. Приклад морського клатера із спайками можна побачити на рисунку 1.

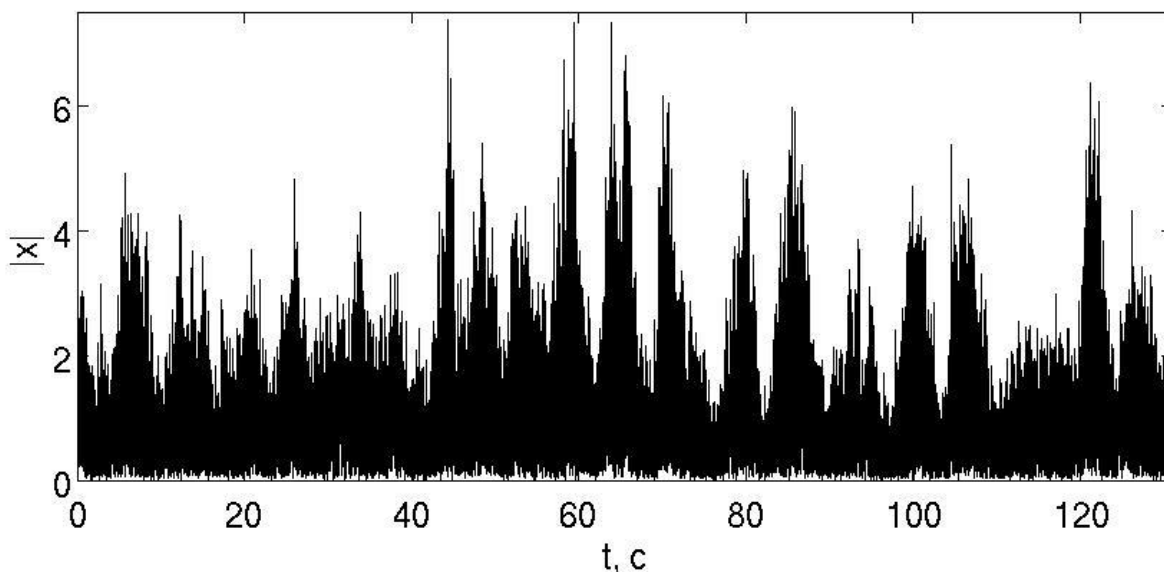


Рис. 1. Інтенсивний морський клатер.

Було помічено, що спайкам на НН поляризації відповідає потужність еквівалентна або навіть вища ніж на VV поляризації, в той час як без спайків потужність на НН на 10 дБ нижча ніж на VV. Для цілей же, створених людиною, міжполяризаційне відношення близьке до 0 дБ. Відповідно до цього було побудовано алгоритм вибору валідних даних, оснований на використанні поляриметричної декомпозиції. Метод показав хороші результати, але потребує повністю поляриметричних радарів для впровадження.

Фільтр Калмана, широко використовуваний в області оптимальної фільтрації, також знайшов застосування для просторової фільтрації морського клатера [38]. Цими ж авторами було запропоновано спосіб подавлення морського клатера, оснований на використанні $\alpha - \beta - \gamma$ фільтра [39]. Дослідниками було помічено, що великомасштабна структура морського клатера близька до низької частоти і є відносно стабільною. Той факт, що низькочастотна складова набагато більш потужна, ніж високочастотна, став основним фактором, який було використано для виявлення цілі, оскільки передній фронт сигналу, відбитого від цілі, має більшу крутизну, а значить, більш високу частоту, ніж великомасштабна структура морського клатера, і потужність сигналу, відбитого від цілі, набагато більша, ніж потужність дрібної високочастотної структури клатера. Ця особливість була покладена в основу дизайну фільтра — по суті, дослідники просто змоделювали фільтр, що придушує нижні частоти. Метод показав хороший результат на реальних даних, але дослідники не вказали, якою була швидкість цілі, тому метод необхідно перевірити на малорухомих цілях, перш ніж стверджувати про його успіх, адже методи СДЦ показують не гірші результати при виявленні швидких цілей.

Останні досягнення в побудові авторегресивних моделей [40] та параметричного виявлення [41] також було використано в області виявлення малорозмірних цілей на фоні клатера. Ідея використання параметричного виявлення основана на припущенні стаціонарності клатера в певному діапазоні, тобто вважається, що клатер має приблизно однаковий Доплерівський спектр у сусідніх комірках. Алгоритм оцінює параметричну модель у комірці і в деякій кількості комірок її миттєвого оточення. В припущенні стаціонарності властивостей клатера в діапазоні інформація в сусідніх комірках усереднюється, щоб отримати модель зразка. Інверсія цієї моделі використовується, щоб відфільтрувати клатер у даній комірці. На Доплерівському спектрі, з якого клатер видалено, можна проводити виявлення цілі.

В [1] для вирішення задачі виявлення малорозмірних малорухомих цілей в морському клатері було запропоновано використовувати критерій кутового шуму. Ознакою появи цілі в елементі роздільної здатності в цьому випадку слугує поява у каналі кутової похибки складової, величина якої змінюється з постійною швидкістю, коли ціль знаходиться в секторі кутів, для яких пеленгаційна характеристика лінійна. Для просторово однорідних завад при відсутності цілі в каналі кутової помилки слід очікувати лише наявності флуктуаційної компоненти. Таким чином, задача виявлення компактної цілі на фоні просторово розподілених завад від моря зводиться до виявлення в каналі кутової похибки відгуку, що лінійно змінюється. Метод розрахований на системи моноімпульсного типу, які формують сигнал кутової похибки по одночасно прийнятих сигналах рознесених в просторі діаграм направленості, але може бути використано і в системах з однопроменевою діаграмою. Для формування сумарного, різницевого сигналів та пеленга в цьому разі використовуються сигнали, прийняті антеною при двох зміщених по куту положень променя.

Ще одним багатообіцяючим методом виявлення малорозмірних малорухомих цілей в інтенсивному морському клатері є метод, оснований на застосуванні мультифрактального аналізу, тобто моделюванні морського клатера не як випадкового, а як детермінованого процесу [42].

Дослідники на базі публічних даних [13] показали, що процес, який представляє морський клатер, є мультифрактальним і представили математичний апарат для виявлення цілей у клатері, який кардинальним чином відрізняється від класичних стохастичних методів виявлення. Новий метод показав 100% виявлення на публічних даних [13], але не був перевірений на іншій, більшій базі вимірних даних морського клатера і малорозмірних цілей [16].

Проаналізувавши ряд методів фрактального аналізу, дослідники зазначили, що для застосування на практиці найбільш зручним при вирішенні задач виявлення малорозмірних малорухомих цілей в морському клатері в

силу своєї простоти є оснований на вейвлетах масштабний фрактальний аналіз [43]. Цікаво те, що запропонований метод показав ефективне виявлення не лише на амплітудних даних реального морського клатера, але і на даних, отриманих в результаті диференціювання та інтегрування амплітудних даних. Недоліком методу можна вважати відсутність методичних підходів до вибору порогу, який обирався емпіричним шляхом, тому для впровадження методу в сучасних морських РЛС необхідно провести роботу по теоретичному обґрунтуванню вибору рівня порогу, а також перевірити метод на більш обширному публічному наборі вимірних даних [16].

Висновки

1. Аналіз доступних у відкритій літературі методів виявлення малорозмірних малорухомих цілей в інтенсивному морському клатері свідчить, що CFAR властивість доведена лише для адаптивного лінійно-квадратичного алгоритму за умови досконалого знання коваріаційної матриці, оцінка якої на практиці відбувається в процесі виявлення цілі і не може бути досконалою. Подальше покращення алгоритму можливе за рахунок збільшення точності оцінки коваріаційної матриці та зменшення обчислювальної складності її оцінки. Зокрема, потребує перевірки на реальних даних алгоритм, заснований на апроксимації коваріаційної матриці матрицею з нижчим рангом.

2. Кращу продуктивність, ніж адаптивний лінійно-квадратичний алгоритм з досконало відомою коваріаційною матрицею, може мати виявлення, основане на мультифрактальному представленні клатера, в разі доведення його коректності. Найбільшого успіху в цій області досяг оснований на вейвлетах масштабний фрактальний аналіз. Але для того, щоб рекомендувати цей метод як оптимальний для вирішення даного класу задач, необхідно здійснити теоретичне обґрунтування вибору рівня порогу та виконати перевірку прийнятності мультифрактальної моделі на більш обширному наборі експериментальних даних.

3. Приклад використання Вейвлет-перетворення з материнською функцією Морлета продемонстрував, що перетворення Фур'є не є оптимальним для моделювання Доплерівського спектра морського клатера і цілі. Необхідно з'ясувати, які властивості даного Вейвлет-перетворення дають перевагу для моделювання клатера, і на основі отриманого критерію здійснити пошук серед інших відомих ортогональних перетворень, щоб виявити оптимальне для вирішення такого класу задач перетворення, або синтезувати нове перетворення за знайденим критерієм, якщо буде доведено теоретичну можливість здійснити такий синтез.

Література

1. Рассеяние радиоволн морем и обнаружение малоскоростных объектов на его фоне [Текст]: дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.03/ Луценко Владислав Иванович: НАН Украины, Ин-т радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова.— Харьков, 2009.— 455 л.

2. Kelly E.J. An adaptive detection algorithm / E.J. Kelly // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.— 1986.— №2.— p. 115–127.
3. Ward K.D. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance / K.D. Ward, R.J.A. Tough, S. Watts.— London: The Institution of Engineering and Technology, 2006.— 452 p.
4. Experimental validation of the compound Gaussian sea clutter model at sub-meter range resolution / [Carretero-Moya J., Gismero-Menoyo J., Asensio-Lopez A., Blanco-del-Campo A.].— Madrid: , 2009.— 5 p.
5. Antipov I. Analysis of sea clutter data / I. Antipov.- Australia: Defence science and technology organization, 1998.— 40 p.
6. Antipov I. Statistical analysis of northern australian coastline sea clutter data / I. Antipov.- Edinburgh South Australia: DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, 2001.— 84 p.
7. Chan H.C. Radar sea-clutter at low grazing angles / H.C. Chan // IEE proceedings - Radar and Signal Processing.— 1990.— №2.— p. 102–112.
8. Chan C.H. Analysis of the north truro sea clutter data / C.H. Chan.— Canada: Defence Research Establishment Ottawa, 1990.— 52 p.
9. Yao K. A representation theorem and its applications to spherically invariant random processes / K. Yao // IEEE Trans.-IT.— 1973.— №5.— p.600–608.
10. Conte E. Asymptotically optimum radar detection in compound-Gaussian clutter / Conte E., Lops M., Ricci G. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.- 1995.— №2.— p. 617–625.
11. Gini F. Covariance matrix estimation for CFAR detection in heavy tailed clutter / F. Gini, M. Greco // Signal Processing.— 2002.— p. 1495–1507.
12. Younsi A. Performance of the adaptive normalized matched filter detector in compound-gaussian clutter with inverse gamma texture model / A. Younsi, M. Nadour // Progress In Electromagnetics Research.— 2011.— p. 21–38.
13. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/>.
14. Herselman P.L. An analysis of X-band calibrated sea clutter and small boat reflectivity at medium-to-low grazing angles / Herselman P.L., Baker C.J., de Wind H.J. // International Journal of Navigation and Observation.— 2008.—14 p.
15. Herselman P.L. Analysis of calibrated sea clutter and boat reflectivity data at C- and X-band in south african coastal waters / P.L. Herselman, C.J. Baker // Radar and electronic warfare systemsGeneral science, engineering & technologyRadar and electronic warfare systemsGeneral science, engineering & technology.— 2007—14 p.
16. http://www.csir.co.za/small_boat_detection/.
17. Herselman P.L. Improved covariance matrix estimation in spectrally inhomogeneous sea clutter with application to adaptive small boat detection / P.L. Herselman, H.J. de Wind // Radar, 2008 International Conference.— 2008.- p. 94 — 99.
18. Panagopoulos S. Small—target detection in sea clutter / S. Panagopoulos, J.J. Soraghan // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.— 2004.— №7.— p. 1355–1361.
19. Schleher D.C. Periscope detection radar / D.C. Schleher // Record of the IEEE international Radar Conference.— 1995.— p. 704–707.
20. McDonald M. Fast versus slow scan radar operation for coherent small target detection in sea clutter / M. McDonald, S. Lycett // IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation.— 2005.— №6.— p. 429–435.
21. Application of the Radon transform to detect small-targets in sea clutter / [Carretero-Moya J., Gismero-Menoyo J., Asensio-Lopez A., Blanco-del-Campo A.] // IET Radar, Sonar and Navigation.— 2009.— №2.— p. 155–166.
22. Chen S.J. Small target detection in heavy sea clutter / Chen S.J., Kong L.J., Yang J.Y. // Progress In Electromagnetics Research B.— 2012.— p. 405–425.

23. Lei Zhao Low-rank stap approach to radar target detection for sea clutter scenarios in radar seekers / Lei Zhao // *Journal of Computational Information Systems.*— 2012.— p. 459–467.
24. Bo Zhang A new covariance matrix estimation method in compound Gaussian sea clutter / Bo Zhang, Feng Luo, Linrang Zhang, Gaogao Liu // *Journal of Computational Information Systems.*— .— p. 9353–9359.
25. Adaptive thresholding in Marine RADARs / [Alaee M., Firoozmand M., Amiri R., Sepahvand M.] // *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering.*— 2010.— №3.— p. 168—174.
26. Farina A. Coherent radar detection in log-normal clutter / Farina A., Russo A., Studer F.A. // *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing.*— 1986.— №1.— p. 39 — 53.
27. Davidson G. Wavelet detection of low observable targets within sea clutter / G. Davidson, H.D. Griffiths // *RADAR.*— 2002.— p. 238 — 242.
28. Waveform-agile tracking in heavy sea clutter / [Sira S.P., Papandreou-Suppappola A., Morrell D., Cochran D.] // *Waveform Diversity and Design Conference.*— 2007.— p. 372 — 376.
29. Hwang S.I. A new technique for the improved accuracy of small ship detection by synthetic aperture radar imagery / S.I. Hwang, K. Ouch // *International Symposium on Antennas and Propagation.*— 2009.— p. 3716 — 3719.
30. Anfinson S.N. Improved target detection in polarimetric sar images by use of Mellin kind statistics / Anfinson S.N., Tao D., Brekke C. // *Proc. POLinSAR.*— 2011.—4 p.
31. Tao D. An experimental study on ship detection based on the fixed-point polarimetric whitening filter / Tao D., Brekke C., Anfinson S. // *Proc. SPIE 8180, Image and Signal Processing for Remote Sensing XVII.*— 2011.—9 p.
32. Sea-clutter modeling using a radial-basis-function neural network / [Hennessey G., Leung H., Drosopoulos A., Yip P.] // *IEEE J. Oceanic Eng.*— 2001.— №3.— p. 358–372.
33. Leung H. Signal detection using the radial basis function coupled map lattice / Leung H., Hennessey G., Drosopoulos A. // *IEEE T. Neural Networ.*— 2000.— №11.— p. 1133–1151.
34. Rico—Ramirez M. Classification of ground clutter and anomalous propagation using dual-polarization weather radar / M. Rico-Ramirez, I. Cluckie // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.*— 2008.— №7.— p. 1892–190.
35. Sea clutter reduction and target enhancement by neural networks in a marine radar system / [Vicen-Bueno R., Carrasco-Alvarez R., Rosa-Zurera M., Nieto-Borge J.C.] // *Sensors.*— 2009.— №3.— p. 1913—1936.
36. Peng Wu A novel method of small target detection in sea clutter / Peng Wu, Jun Wang, Wenguang Wang // *International Scholarly Research Network Signal Processing.*— 2011.—10 p.
37. Ward K.D. Sea spikes and radar false alarm rates / Ward K.D., Tough R.J.A., Shepherd P.W. // *3rd EMRS DTC Technical Conference.*— 2006.— 6 p.
38. Liu Jingyao Radar sea clutter suppression and target indication with a spatial tracking filter / Liu Jingyao, Meng Huadong, Zhang Hao, Wang Xiqin // *Tsinghua Science And Technology.*— 2010.— №2.— .
39. Jingyao Liu Radar sea clutter suppression and target detection with α - β - γ filter / Jingyao Liu, Huadong Meng, Xiqin Wang // *9th International Conference on Signal Processing.*— 2008.— p. 2376 — 2379.
40. Recursive errors-in-variables approach for ar parameter estimation from noisy observations. Application to radar sea clutter rejection / [Petitjean J., Diversi R. a.o.] // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing.*— 2009.— p. 3401 — 3404.

41. Wensink H.E. On parametric detection of small targets in sea clutter / H.E. Wensink // Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion.— 2000.— p. 17—24.

42. Jing Hu Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis / Jing Hu, Jianbo Gao, Kung Yao, Ungsik Kim // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.— 2005.— p. 709 — 712.

43. Target detection within sea clutter: a comparative study by fractal scaling analyses / [Jing Hu, Jianbo Gao, F.L. Posner a.o.].— West Lafayette: Purdue University, 2006.— 40 p..

References

1. Rassieianiie radiovoln morem i obnaruzhenie maloskorostnykh obektov na yeho fone [Tekst]: dis...d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.03/ Lutsenko vladimir Ivanovich: NAN Ukrainy, Institut radiofiziki i eliektroniki im. A. Ya. Usikova..-Kharkov, 2009.-455 l.

2. Kelly E.J. An adaptive detection algorithm / E.J. Kelly // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.- 1986.- №2.- p. 115—127.

3. Ward K.D. Sea clutter: scattering, the K distribution and radar performance / K.D. Ward, R.J.A. Tough, S. Watts.- London: The Institution of Engineering and Technology, 2006.- 452 p.

4. Experimental validation of the compound Gaussian sea clutter model at sub-meter range resolution / [Carretero-Moya J., Gismero-Menoyo J., Asensio-Lopez A., Blanco-del-Campo A.].- Madrid: , 2009.- 5 p.

5. Antipov I. Analysis of sea clutter data / I. Antipov.- Australia: Defence science and technology organization, 1998.- 40 p.

6. Antipov I. Statistical analysis of northern australian coastline sea clutter data / I. Antipov.- Edinburgh South Australia: DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, 2001.- 84 p.

7. Chan H.C. Radar sea-clutter at low grazing angles / H.C. Chan // IEE proceedings - Radar and Signal Processing.- 1990.- №2.- p. 102-112.

8. Chan C.H. Analysis of the north truro sea clutter data / C.H. Chan.- Canada: Defence Research Establishment Ottawa, 1990.- 52 p.

9. Yao K. A representation theorem and its applications to spherically invariant random processes / K. Yao // IEEE Trans.-IT.- 1973.- №5.- p.600-608.

10. Conte E. Asymptotically optimum radar detection in compound-Gaussian clutter / Conte E., Lops M., Ricci G. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.- 1995.- №2.- p. 617—625.

11. Gini F. Covariance matrix estimation for CFAR detection in heavy tailed clutter / F. Gini, M. Greco // Signal Processing.- 2002.- p. 1495—1507.

12. Younsi A. Performance of the adaptive normalized matched filter detector in compound-gaussian clutter with inverse gamma texture model / A. Younsi, M. Nadour // Progress In Electromagnetics Research.- 2011.- p. 21—38.

13. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/>.

14. Herselman P.L. An analysis of X-band calibrated sea clutter and small boat reflectivity at medium-to-low grazing angles / Herselman P.L., Baker C.J., de Wind H.J. // International Journal of Navigation and Observation.- 2008.-14 p.

15. Herselman P.L. Analysis of calibrated sea clutter and boat reflectivity data at C- and X-band in south african coastal waters / P.L. Herselman, C.J. Baker // Radar and electronic warfare systemsGeneral science, engineering & technologyRadar and electronic warfare systemsGeneral science, engineering & technology.- 2007.-14 p.

16. http://www.csir.co.za/small_boat_detection/.

17. Herselman P.L. Improved covariance matrix estimation in spectrally inhomogeneous sea clutter with application to adaptive small boat detection / P.L. Herselman, H.J. de Wind // Radar, 2008 International Conference.- 2008.- p. 94 - 99.

18. Panagopoulos S. Small-target detection in sea clutter / S. Panagopoulos, J.J. Soraghan // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.- 2004.- №7.- p. 1355–1361.
19. Schleher D.C. Periscope detection radar / D.C. Schleher // *Record of the IEEE international Radar Conference*.- 1995.- p. 704–707.
20. McDonald M. Fast versus slow scan radar operation for coherent small target detection in sea clutter / M. McDonald, S. Lycett // *IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation*.- 2005.- №6.- p. 429–435.
21. Application of the Radon transform to detect small-targets in sea clutter / [Carretero-Moya J., Gismero-Menoyo J., Asensio-Lopez A., Blanco-del-Campo A.] // *IET Radar, Sonar and Navigation*.- 2009.- №2.- p. 155–166.
22. Chen S.J. Small target detection in heavy sea clutter / Chen S.J., Kong L.J., Yang J.Y. // *Progress In Electromagnetics Research B*.- 2012.- p. 405–425.
23. Lei Zhao Low-rank stap approach to radar target detection for sea clutter scenarios in radar seekers / Lei Zhao // *Journal of Computational Information Systems*.- 2012.- p. 459–467.
24. Bo Zhang A new covariance matrix estimation method in compound Gaussian sea clutter / Bo Zhang, Feng Luo, Linrang Zhang, Gaogao Liu // *Journal of Computational Information Systems*.- .- p. 9353–9359.
25. Adaptive thresholding in Marine RADARs / [Alaee M., Firoozmand M., Amiri R., Sepahvand M.] // *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*.- 2010.- №3.- p. 168–174.
26. Farina A. Coherent radar detection in log-normal clutter / Farina A., Russo A., Studer F.A. // *IEE Proceedings F Communications, Radar and Signal Processing*.- 1986.- №1.- p. 39 - 53.
27. Davidson G. Wavelet detection of low observable targets within sea clutter / G. Davidson, H.D. Griffiths // *RADAR*.- 2002.- p. 238 - 242.
28. Waveform-agile tracking in heavy sea clutter / [Sira S.P., Papandreou-Suppappola A., Morrell D., Cochran D.] // *Waveform Diversity and Design Conference*.- 2007.- p. 372 - 376.
29. Hwang S.I. A new technique for the improved accuracy of small ship detection by synthetic aperture radar imagery / S.I. Hwang, K. Ouch // *International Symposium on Antennas and Propagation*.- 2009.- p. 3716 - 3719.
30. Anfinson S.N. Improved target detection in polarimetric sar images by use of Mellin kind statistics / Anfinson S.N., Tao D., Brekke C. // *Proc. POLinSAR*.- 2011.-4 p..
31. Tao D. An experimental study on ship detection based on the fixed-point polarimetric whitening filter / Tao D., Brekke C., Anfinson S. // *Proc. SPIE 8180, Image and Signal Processing for Remote Sensing XVII*.- 2011.-9 p..
32. Sea-clutter modeling using a radial-basis-function neural network / [Hennessey G., Leung H., Drosopoulos A., Yip P.] // *IEEE J. Oceanic Eng.*- 2001.- №3.- p. 358–372.
33. Leung H. Signal detection using the radial basis function coupled map lattice / Leung H., Hennessey G., Drosopoulos A. // *IEEE T. Neural Networ.*- 2000.- №11.- p. 1133–1151.
34. Rico-Ramirez M. Classification of ground clutter and anomalous propagation using dual-polarization weather radar / M. Rico-Ramirez, I. Cluckie // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.- 2008.- №7.- p. 1892–190.
35. Sea clutter reduction and target enhancement by neural networks in a marine radar system / [Vicen-Bueno R., Carrasco-Alvarez R., Rosa-Zurera M., Nieto-Borge J.C.] // *Sensors*.- 2009.- №3.- p. 1913-1936.
36. Peng Wu A novel method of small target detection in sea clutter / Peng Wu, Jun Wang, Wenguang Wang // *International Scholarly Research Network Signal Processing*.- 2011.-10 p.
37. Ward K.D. Sea spikes and radar false alarm rates / Ward K.D., Tough R.J.A., Shepherd P.W. // *3rd EMRS DTC Technical Conference*.- 2006.- 6 p..

38. Liu Jingya Radar sea clutter suppression and target indication with a spatial tracking filter / Liu Jingyao, Meng Huadong, Zhang Hao, Wang Xiqin // Tsinghua Science And Technology.- 2010.- №2.- .

39. Jingyao Liu Radar sea clutter suppression and target detection with α - β - γ filter / Jingyao Liu, Huadong Meng, Xiqin Wang // 9th International Conference on Signal Processing.- 2008.- p. 2376 - 2379.

40. Recursive errors-in-variables approach for ar parameter estimation from noisy observations. Application to radar sea clutter rejection / [Petitjean J., Diversi R. a.o.] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing.- 2009.- p. 3401 - 3404.

41. Wensink H.E. On parametric detection of small targets in sea clutter / H.E. Wensink // Proceedings of the Third International Conference on Information Fusion.- 2000.- p. 17-24.

42. Jing Hu Detection of low observable targets within sea clutter by structure function based multifractal analysis / Jing Hu, Jianbo Gao, Kung Yao, Ungsik Kim // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing.- 2005.- p. 709 - 712.

43. Target detection within sea clutter: a comparative study by fractal scaling analyses / [Jing Hu, Jianbo Gao, F.L. Posner a.o.] - West Lafayette: Purdue University, 2006.- 40 p..

Мрачковський О. Д., Правда В. І., Турко С. І. Методи виявлення малорозмірних малорухомих цілей на фоні інтенсивного морського клатера. В роботі здійснюється пошук методів виявлення малорозмірних малорухомих цілей морськими РЛС. В результаті аналізу джерел обирається три перспективні групи методів – адаптивні методи, основані на представленні амплітуди клатера сферично інваріантним випадковим процесом, методи, основані на представленні клатера детермінованим процесом, основані на ортогональних перетвореннях. Окремо відзначається використання нейронних мереж та поляризаційних властивостей клатера.

Ключові слова: морський клатер, К-розподіл, відношення правдоподібності, адаптивне виявлення, коваріаційна матриця, багатощаровий перцептрон, нейронні мережі, поляриметрична декомпозиція, вектор Паулі, поляриметрична ентропія, параметр Херста, фрактальний аналіз.

Мрачковский О. Д., Правда В. И., Турко С. И. Методы обнаружения малоразмерных малоподвижных целей на фоне интенсивного морского клатера. В работе осуществляется поиск методов обнаружения малоразмерных малоподвижных целей морскими РЛС. В результате анализа источников избирается три перспективные группы методов – адаптивные методы, основанные на представлении амплитуды клатера сферически инвариантным случайным процессом, методы, основанные на моделировании клатера детерминированным процессом и методы, основанные на ортогональных преобразованиях. Отдельно отмечается использование нейронных сетей и поляризационных свойств клатера.

Ключевые слова: морской клатер, К-распределение, отношения правдоподобия, адаптивное обнаружение, ковариационная матрица, многослойный перцептрон, нейронные сети, поляриметрическая декомпозиция, вектор Паули, поляриметрическая энтропия, параметр Херста, фрактальный анализ.

Mrachkovsky O., Pravda V., Turko S. Methods of small slow moving targets detection in heavy sea clutter. The search for methods of small targets detection by marine radars is carried out in this paper. As a result of the sources analysis three promising group of methods are selected – adaptive methods based on the clutter amplitude spherically invariant random process representation, methods based on non stochastic clutter representation and methods based on orthogonal transformations. Separately, neural networks and clutter polarization properties are noticed.

Most of researches consider compound Gaussian distribution for high resolution sea clutter data modeling. Adaptive CFAR algorithm developed by Kelly for Gaussian clutter was extended for spherical invariant random process. This algorithm can detect target in compound Gaussian clutter and ensure CFAR detection if covariance matrix is precisely known. Many researches proposed different methods of covariance matrix estimating using information from cells adjacent with cell under test. Progress in this field is moving to finding less computation cost but more precise methods of covariance matrix estimation.

Further progress for small slow moving targets in heavy sea clutter detection can develop in 3 ways – improving covariance matrix estimation, exploiting not stochastic methods and finding best orthogonal transform for sea clutter Doppler spectrum describing.

Keywords: *sea clutter, K-distribution, likelihood ratio, adaptive detection, covariance matrix, multilayer perceptron, neural networks, polarimetric decomposition, Pauli vector, polarimetric entropy, Hurst parameter, fractal analyses.*