

**ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОРСЬКОГО КЛАТЕРА,
ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ВИЯВЛЕННЯ МАЛОРОЗМІРНИХ
МАЛОРУХОМИХ ЦІЛЕЙ МОРСЬКИМИ РЛС**

Мрачковський О. Д., к.т.н., доцент; Турко С. І., аспірант

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

**MAIN SEA CLUTTER CHARACTERISTICS IMPACTING SMALL SLOW
MOVING TARGETS DETECTION BY MARINE RADARS**

*Mrachkovskiy O. D., Cand. Of Sci (Technics); Turko S. I., postgraduate student
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

Вступ

Точне знання властивостей морських завад має велике значення для розробки сучасних морських радарів, оскільки ці знання безпосередньо впливають на оптимізацію процесу виявлення, головним чином через реалізацію приймача, що максимізує ймовірність правильного виявлення при заданому значенні хибної тривоги. Основним видом завад для морських РЛС є небажані відбиття від морської поверхні, або як їх часто називають у англійській літературі, клатер.

Властивості, які використовуються, щоб охарактеризувати морський клатер [1]:

- нормована ефективна поверхня розсіювання морського клатера σ_0 ;
- функція розподілу ймовірностей амплітуди або потужності клатера;
- доплерівський спектр клатера;
- просторово-часові характеристики клатера;
- поляризаційні властивості клатера.

Характеристики морського клатера залежать від роздільної здатності РЛС, і оскільки для виявлення малорозмірних цілей використовуються РЛС з високою роздільною здатністю, в даній роботі основний акцент зроблено на характеристиках морського клатера, отриманого РЛС з високою роздільною здатністю.

Метою роботи є огляд існуючих моделей морського клатера і створення їх класифікації для вибору моделі, яка є найбільш прийнятною для побудови на її основі алгоритму виявлення малорозмірних малорухомих цілей в морському клатері.

Морський клатер як стохастичний процес

Потужність клатера P_r на вході приймача РЛС із спільною антеною для передачі і прийому з коефіцієнтом підсилення G_t і передаваною поту-

жністю P_t , визначається площею опромінюваної ділянки моря A_e , що знаходиться на відстані R від антени, наступним чином [2]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \times \frac{\sigma}{4\pi R^2} \times A_e,$$

де σ — нормована ефективна поверхня розсіювання морського клатера.

Постійно змінний і складний характер поверхні моря означає, що миттєва ефективна поверхня розсіювання весь час змінюється в широких межах навколо середнього значення, яке визначається σ . Статистика цих флуктуацій є важливою характеристикою морського клатера. Амплітудні статистики однієї точки описуються за допомогою сімейства функцій щільності імовірності із специфічним розподілом, відповідним для даного набору спостережень.

Основний вклад у флуктуації вносять дві складові. По-перше, зміна місцевої форми поверхні, кута ковзання, пульсації піни і інших факторів, пов'язаних з проходженням довгих хвиль і збрижів, змушують вдбитий від невеликих місцевих ділянок сигнал широко змінюватися навколо середнього значення. По-друге, розсіювання відбувається від багатьох дрібних структур (розсіювачів), які рухаються один відносно одного і створюють інтерференцію в розсіяному сигналі (спекл).

Спекл часто описується як векторна сума відбиттів від багатьох випадково розташованих розсіювачів, що породжує Гаусову статистику. Щільність ймовірності розподілу амплітуди огинаючої E цих відбиттів описується розподілом Релея:

$$P(E) = \frac{2E}{x} \exp\left(\frac{-E^2}{x}\right); 0 \leq E < \infty,$$

де x — середня інтенсивність відбитого сигналу.

Для радарів, що мають низьку роздільну здатність і розміри опромінюваної ділянки набагато більші, ніж довжина морських хвиль, і для кутів ковзання більших близько 10° , клатер, як правило, моделюють просто як спекл з обвідною, розподіленою за законом Релея. Клатер має короткий інтервал кореляції в діапазоні 5-10 мс, і досить добре декорелюється від імпульсу до імпульсу за умови використання радаром перестроювання частоти (за умови, що радар змінює частоту від імпульсу до імпульсу, щонайменше на величину ширини спектра передаваного імпульсу).

Якщо роздільна здатність радару збільшується, і для невеликих кутів ковзання, в розподілі амплітуди огинаючої клатера спостерігаються більші «хвости» і у відбитому сигналі спостерігаються всплески [3]. Іншими словами, існує висока ймовірність більших значень амплітуди (по відношенню до її середнього значення) у порівнянні з очікуваними за умови розподілу Релея. Це є результатом того, що радар починає розрізняти структуру поверхні моря. В додачу до відхилення від розподілу Релея часові і прос-

торові кореляційні властивості клатера для радарів з високою роздільною здатністю також змінюються у порівнянні зі спеклом. Зокрема, перестроювання частоти більше не здатне декорелювати клатер і інтервал кореляції розтягується на секунди, а не мілісекунди. Крім того, з'являється проста рова кореляція поза межами ділянки, опромінюваної радаром.

Щоб змоделювати розподіл амплітуди або інтенсивності морського клатера для радарів з високою роздільною здатністю, було запропоновано багато моделей. Серед них найбільшого поширення набули К розподіл [1], логнормальний розподіл [4] і розподіл Вейбула [5].

Феноменологічне пояснення було дано K розподілу, який належить до компоновано-гаусових моделей [6], тому що отримується шляхом компонування двох випадкових величин, текстури і спеклу. Відповідно до цієї інтерпретації, зразки комплексної обвідної процесу морського клатера можна представити у вигляді добутку двох компонент:

$$z(n) = \sqrt{\tau(n)}g(n),$$

де множник $g(n) = g_I(n) + jg_Q(n)$ — стаціонарний комплексний Гаусів процес, який зазвичай називають спеклом, відповідає місцевому зворотньому розсіюванню; $g_I(n)$ та $g_Q(n)$ — інфазна та квадратурна компоненти $g(n)$. Множник $\tau(n)$ — невід'ємний дійсний випадковий процес, який, як правило, називають текстурою.

Вираз для щільності ймовірності огинаючої Релеєвського процесу може бути переписаний в компонованій формі, щоб підкреслити його залежність від локальної середньої інтенсивності x :

$$P(E|x) = \frac{2E}{x} \exp(-E^2/x); 0 < E < \infty$$

Ця локальна інтенсивність сама є випадковою величиною, значення якої мають щільність ймовірності $P_c(x)$. В результаті щільність ймовірності огинаючої не Гаусового сигналу отримується в результаті інтегрування локальної Релеєвської щільності ймовірності по $P_c(x)$

$$P(E) = \int_0^{\infty} dx P(E|x) P_c(x) = 2E \int_0^{\infty} \frac{dx}{x} \exp(-E^2/x) P_c(x)$$

Найпоширенішим в літературі розподілом, що відповідає $P_c(x)$, став гамма-розподіл:

$$P_c(x) = \frac{b^\nu}{\Gamma(\nu)} x^{\nu-1} \exp(-bx); 0 \leq x < \infty,$$

де ν — формуючий параметер, b - параметр масштабу, $\Gamma(\cdot)$ — гамма функція. Коли гамма-розподіл підставити в компоновану форму, отримаємо К-

розподіл, який, як вважається сьогодні в більшості джерел, найбільш близько описує амплітудний розподіл огинаючої клатера:

$$P(E) = \frac{4b^{(v+1)/2} E^v}{\Gamma(v)} K_{v-1}(2E\sqrt{b}),$$

де $K_{v-1}(\cdot)$ — модифікована функція Бесселя третього роду порядку $v-1$, або K -функція. Тобто K розподіл обвідної — це компонований розподіл, що складається з локального спеклу, розподіленого за законом Релея, чие середнє значення модульоване гамма розподілом.

Спеклова складова, як вважається, отримується за рахунок розсіювання в першу чергу на капілярних хвилях і збрижах, в той час як модулююча середнє значення текстура вважається отриманою внаслідок відбиття від морських хвиль, зумовлених гравітацією.

Крім гамма-розподілу, для текстури використовувалися такі розподіли як логнормальний, узагальнений гаусів і інверсний гамма-розподіл [6-7]

У роботі [6] було відзначено, що для роздільної здатності по дальності в 3 метри компонований Гаусів і K розподіл не забезпечують хорошої апроксимації. K розподіл було розширено, щоб врахувати різні типи явища всплесків (спайків). Наприклад, компонований K - A розподіл утворюється з використанням розподілу Пуассона, гамма-розподілу і розподілу Релея. Донгом [8] було запропоновано KK і Вейбулл-Вейбулл (WW) розподіли для морського клатера з високою роздільною здатністю і високим кутом ковзання. Результати дослідження показали, що KK , WW і KA розподіли дають однакову якість для моделювання такого клатера. Однак оцінка параметрів для KK і WW розподілів простіша, ніж для K -розподілу. Ефективність KK розподілу для опису амплітудної статистики морського клатера для середніх кутів ковзання (15-45) експериментально підтверджено в [9]. Для подальшого спрощення оцінки параметрів, необхідних для моделювання щільності ймовірності амплітуд морського клатера, було запропоновано використання розподілу Парето [10].

Ефективність K -розподілу з логнормальною текстурою для моделювання морського клатера в РЛС з дуже високої роздільної здатністю (7,5 см) було експериментально підтверджено в [11].

Підтвердження ефективності K -розподілу як ефективної моделі представлення статистики морського клатера на основі аналізу вимірних даних морського клатера міститься в роботах [12-16]. В роботі [17] на основі аналізу вимірних даних морського клатера показано, що розподіл Вейбула і K -розподілом однаково добре апроксимують статистику морського клатера, коли формуючий параметер знаходиться в межах визначеного діапазону, тому не дивно, що в деяких роботах моделювання амплітудної статистик морського клатера розподілом Вейбула також знаходить експериментальне підтвердження [18-19], але в цих же роботах зазначається, що

в певному діапазоні кутів ковзання, роздільних здатностей та висоти морської хвилі кращою апроксимацією є логвейбуловий чи логнормальний розподіли.

Доплерівські характеристики морського клатера

Когерентні РЛС, що використовують доплерівську обробку, можуть розрізнити ціль від клатеру, якщо радіальна швидкість цілі досить висока. На рис. 1 зображено доплерівський спектр морського клатера і швидкої цілі. Для виявлення таких цілей можна використати РЛС із селекцією доплерівських цілей.

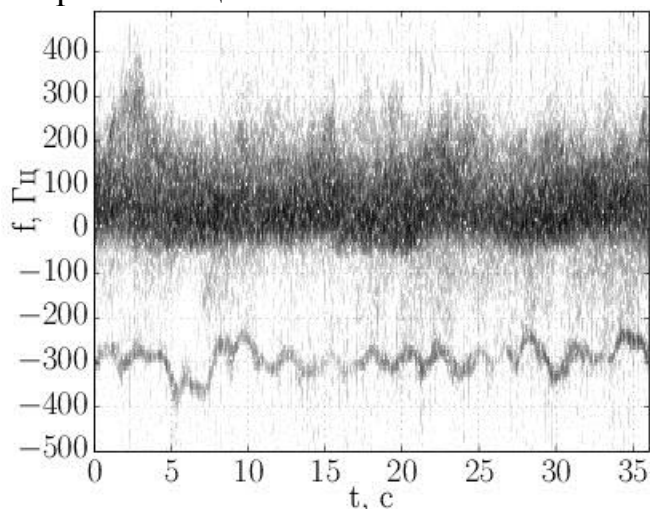


Рис. 1. Доплерівський спектр цілі і клатера.
Висока швидкість цілі.

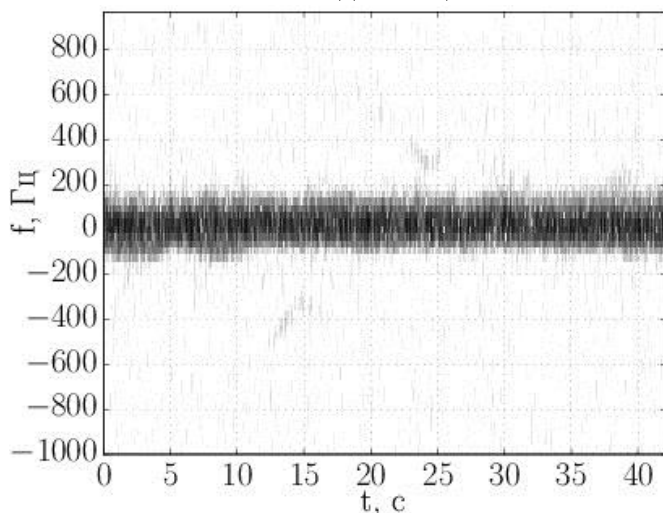


Рис. 2. Доплерівський спектр цілі і клатера.
Низька швидкість цілі.

Однак, деякі цілі мають доплерівський зсув, який не відрізняється від доплерівського спектра клатера (рис. 2). У цих випадках для розробника радара важливе детальне розуміння характеристик доплерівського спектра для всіх різних умов, які можуть зустрітися.

В літературі зустрічається три основні моделі доплерівського спектра морського клатера: Лі, Валкера і Варда. Розгляд цих моделей важливий для розуміння природи морського клатера, але для побудови алгоритму виявлення малорозмірних малорухомих цілей в морському клатера жодна з цих моделей не дає особливих переваг [20-22].

Оскільки морський клатер, на відміну від земного, має зсув по доплеру, відмінний від нуля, малорухомі цілі не можуть бути ефективно виявлені на його фоні з використанням доплерівських методів. Але щоб остаточно відкинути доплерівські ме-

тоди при виборі моделі, придатної для створення алгоритму виявлення, необхідно розглянути крім перетворення Фур'є інші перетворення, які можуть бути використані для моделювання доплерівського спектра клатера і цілі.

Детерміновані моделі морського клатера

Використання теорії хаосу для моделювання морських завад було запропоновано в [23]. Внаслідок аналізу публічного набору даних *IPIX* [24], було зроблено висновок, що морський клатер може розглядатися як прояв хаотичної системи (підклас динамічних систем). Набір *IPIX* включає в себе реальні дані морського радара, виміряні в різних умовах на узбережжі Канади. Насправді, вибір хаотичної моделі для опису морського клатера не є чимось несподіваним, оскільки процеси, пов'язані з виникненням морського клатеру, є в своїй основі не випадковими, а чисто детермінованими явищами (рух морської хвилі описується гідродинамічною теорією, а розсіювання радіохвиль електромагнітною, обидві теорії основані лише на детермінованих моделях). Таким чином, спроба детермінованого опису явища морського клатера має право на існування, і єдина причина для прийняття стохастичного опису є складність моделі і недосконале знання початкових умов. Хаотичне моделювання кидає виклик класичним алгоритмам виявлення, оскільки останні опираються на статистику. В [25] зазначено, що пристрій виявлення, оснований на передбачуваних властивостях хаотичних систем, може значно покращити характеристики виявлення у порівнянні з пристроєм, основаним на стохастичних властивостях.

Класична хаотична модель, запропонована в [23], є експоненційною, також відомою як експоненційно чутлива до початкових умов модель (*ESIC, exponential sensitivity to initial conditions*). Було зроблено припущення, що система, яка має еволюцію з оцінюваним позитивним найбільшим показником Ляпунова та нецілою фрактальною розмірністю — хаотична система, а також зроблено висновок, що морський клатер є хаотичним. Однак, ряд дослідників [26-27] ставлять під сумнів цей висновок. Показано, що два основні інваріанти в [23], а саме «максимальної правдоподібності оцінки кореляційної розмірності» і «хибних найближчих сусідів» є проблематичними для аналізу виміряних даних морського клатера, оскільки обидва інваріанти можуть інтерпретувати стохастичний (а значить, чисто випадковий) процес як хаос.

Спроба змоделювати морський клатер як хаотичний процес отримала подальший розвиток у [28], де було показано, що узагальнення класичної хаотичної моделі, а саме степенева чутливість до початкових умов (*PSIC power-law sensitivity to initial conditions*), може бути використано, щоб охарактеризувати морський клатер.

Використання концепції *PSIC* на наборі даних *IPIX* дозволило отримати 100% результативність виявлення, але цей результат має бути перевірений на інших публічних наборах даних (наприклад, *CSIR* [29]), перед тим як стверджувати про успіх методу. Цими ж авторами було запропоновано моделювати статистичний розподіл диференційної амплітуди (різниця амплітуд сусідніх смплів) за допомогою розподілу Цаліса [30].

На основі набору даних *IPIX* було показано, що розподіл Цаліса добре апроксимує розподіл диференціальної амплітуди морського клатера, як це показано на рис. 3.

Апроксимація K -розподілом амплітуди (звичайної, а не диференційної) того ж самого набору даних клатера ([24], файл 54), дає дещо гірший результат (рис. 4):

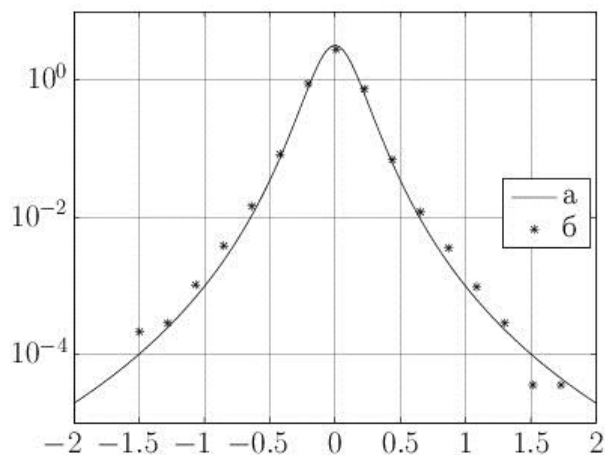


Рис. 3. а — функція щільності ймовірності, розподілена за законом Цаліса; б — емпірична функція щільності ймовірності диференціальних даних морського клатера

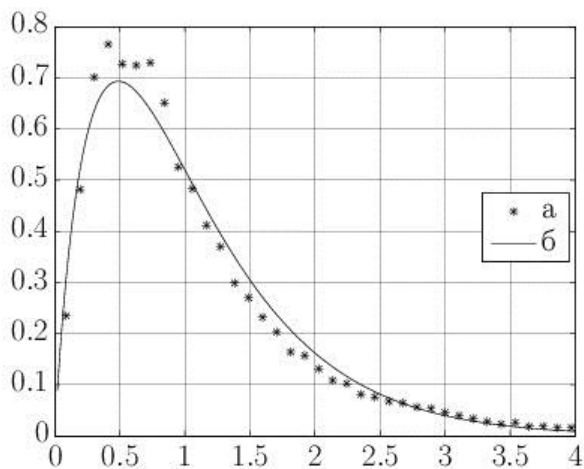


Рис. 4. а — емпірична функція розподілу щільності ймовірності амплітудних даних морського клатера; б — K -розподілена функція щільності ймовірності

[45], в якій детально описано характеристики морського клатера та різних цілей при різноманітних умовах, запропоновано моделювати морський клатер на основі напівмарківських процесів та спосіб покращення виявлення малорозмірних малорухомих цілей на фоні морського клатера з використанням критерія кутового шуму.

Симуляція морського клатера

Для перевірки алгоритмів, спрямованих на боротьбу з морським клатером, та глибшого розуміння природи морського клатера багато робіт присвячено симуляції морського клатера [31-35].

Але більш прийнятним способом перевірки алгоритму є його перевірка на реальних даних. Існує багато робіт, в яких дослідження характеристик морського клатера та перевірка алгоритмів виявлення цілей оцінюється на наборах даних, недоступних для широкого загалу, наприклад [36-37] та інші. Але на даний момент існують також публічно доступні набори даних морського клатера, виміряних у водах Канади [24] та Південно Африканської Республіки [29] спеціально для задач виявлення малорозмірних малорухомих цілей при низьких кутах ковзання.

Значний вклад в розвиток теорії морського клатера зроблено вітчизняними вченими з Харківських підрозділів НАН України [38-47]. Особливо слід відзначити роботу

Висновки

В результаті огляду можна здійснити деяку систематизацію моделей морського клатера. З точки зору створення алгоритмів виявлення малорозмірних малорухомих цілей на фоні інтенсивного морського клатера моделі морського клатера для РЛС з високою роздільною здатністю можна розділити на три групи: стохастичні моделі, детерміновані моделі та доплерівські моделі.

Стохастичні моделі ґрунтовані на представленні амплітуди клатера випадковим процесом. За видом розподілу такі моделі поділяються на моделі з компоновано Гаусовим розподілом, розподілом Вейбула, логнормальним і логвейбуловим розподілом. Компоновано гаусові моделі за видом текстурі поділяють на моделі з гамма текстурою (K -розподіл), інверсною гамма текстурою та логнормальною текстурою. Окремо слід виділити комбіновані розподіли (KK , KA , WW розподіли та розподіл Парето) та розподіли диференціальних даних клатера (розподіл Цаліса). Більшість науковців вважають компоновано гаусову модель найбільш прийнятною для опису морського клатера.

Детерміновані моделі ґрунтовані на представленні морського клатера хаотичним процесом. Серед цих моделей слід виділити дві — *ESIC* та *PSIC*. Можливість моделювати клатер на основі *PSIC* досі не була заперечена, тому побудові алгоритму виявлення на основі стохастичної моделі повинне передувати доведення або заперечення можливості коректного виявлення цілей на основі *PSIC* моделі.

Доплерівські характеристики морського клатера і цілей свідчать, що малорухомі малорозмірні цілі при наявності інтенсивного морського клатера не можуть бути ефективно виявлені з використанням методів СДЦ. Статистична модель, яка найкращим чином описує амплітуду клатера — це компонована гаусова модель, підвидами якої є різновиди K -розподілу, тому для виявлення малорозмірних малорухомих цілей в морському клатері необхідно використовувати добре розроблений в останні два десятиліття апарат виявлення при наявності симетричних випадкових векторів. Алгоритм необхідно перевірити на публічних базах даних, що містять результати вимірювань РЛС з високою роздільною здатністю сигналу, відбитого від моря і від цілі, а також підтвердити або заперечити доцільність використання детермінованих моделей як альтернативи стохастичним.

Література

1. 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.
2. Skolnik M. I. Radar handbook / M. I. Skolnik. — New York: McGraw-Hill, 2008. — 1352 p.

3. Posner F. L. Experimental observations at very low grazing angles of high range resolution Microwave backscatter from the sea / F. L. Posner. — Washington: Naval research laboratory, 1998. — 53 p.
4. 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.
5. Long M. W. Radar reflectivity of land and sea / M. W. Long. — Boston: Artech House, 2001. — 221 p.
6. Greco M. Statistical analysis of real polarimetric clutter data at different range resolutions / Greco M., Gini F., Rangaswamy M. // IEE Proceedings — Radar, Sonar and Navigation. — 2006. — №6. — p. 473—481.
7. Balleri A. Maximum likelihood estimation for compound-gaussian clutter with inverse gamma texture / Balleri A., Nehorai A., Wang J. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.- 2009.— №2.— p. 129—132.
8. Dong Y. Distribution of X-Band high resolution and high grazing angle sea clutter / Y. Dong.- Edinburgh South Australia: Defense Science Technology Organization, 2006.— 68 p.
9. Rosenberg L. Analysis of the KK-distribution with X-band medium grazing angle sea-clutter / Rosenberg L., Crisp D.J., Stacy N.J. // International Radar Conference — Surveillance for a safer world.— 2009.— 6 p.
10. Farshchian M. The Pareto distribution for low grazing angle and high resolution X-band sea clutter / M. Farshchian, F.L. Posner // IEEE Radar Conference.— 2010,— p. 789 — 793.
11. 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.] // Radar Conference — Surveillance for a Safer World, 2009. RADAR. International.— 2009.— 5 p.
12. Antipov I. Analysis of sea clutter data / I. Antipov.— Australia: Defence science and technology organization, 1998.— 40 p.
13. 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.
14. Chan C.H. Analysis of the north truro sea clutter data / C.H. Chan.— Canada: Defence Research Establishment Ottawa, 1990.— 52 p.
15. Dong Y. Statistical measures of S-band sea clutter and targets / Y. Dong, D. Merrett.— Edinburgh South Australia: Electronic Warfare and Radar Division Defence Science and Technology Organisation, 2008.— 62 p.
16. Chan H.C. Radar sea-clutter at low grazing angles / H.C. Chan // IEE proceedings — Radar and Signal Processing.— 1990.— №2.— p. 102—112.
17. Yunhan D. Clutter spatial distribution and new approaches of parameter estimation for Weibull and K-distributions / D. Yunhan.- Australia: DSTO Systems Sciences Laboratory, 2004.— 55 p.
18. Characterization of fluctuation statistics of radar clutter for Indian terrain / [Menon K.R., Balakrishnan K.N., Janakiraman M., Ramchand K.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.— 1995.— №2.— p 317 — 324.
19. Effect of changes in sea-surface state on statistical characteristics of sea clutter with X-band radar / Ishii S., Sayama S., Mizutani K. // Wireless Engineering and Technology.— 2011.— №2.— p. 175—183.

20. Hwang P.A. Breaking wave contribution to low grazing angle radar backscatter from the ocean surface / Hwang P.A., Sletten M.A., Toporkov J.V. // *Journal of geophysical research.*— 2008.— 12 p.
21. Raynal A.M. Doppler characteristics of sea clutter / A.M. Raynal, A.W. Doerry.— New Mexico: Sandia National Laboratories, 2010.— 38 p.
22. Lamont-Smith T. Scattering components from low grazing angle sea clutter / Lamont-Smith T., Shepherd P.W., Gates M.R. // 1st EMRS DTC Technical Conference.— 2004.— 6 p.
23. Chaotic dynamics of sea clutter / S. Haykin, S. Puthusserypady // *Chaos.*— 1997.— №4.— p. 777—802.
24. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/>.
25. McDonald M.K. Chaotic sea clutter returns / M.K. McDonald.— Ottawa: Defence Research Establishment, 2001.— 54 p.
26. Unsworth C.P. False detection of chaotic behaviour in the stochastic compound K-distribution model of radar sea clutter / Unsworth C.P., Cowper M.R., McLaughlin, B. Mulgrew S. // *Proc. of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing.*— 2000.— №10.— p. 296—300.
27. McDonald M.K. Limitations of non-linear dynamics in predicting sea clutter returns / M.K. McDonald, A. Damini.— Ottawa: Defence R&D, 2002.— 26 p.
28. Jing Hu Power-law sensitivity to initial conditions in sea clutter / Jing Hu, Jianbo Gao, Kung Yao // *IEEE 2005 International Radar Conference.*— 2005.— p. 956—961.
29. http://www.csir.co.za/small_boat_detection/.
30. Jing Hu A new way to model nonstationary sea clutter / Jing Hu, Wen-wen Tung, Jianbo Gao // *IEEE Signal Processing Letters.*— 2009.— №2.— p. 129—132.
31. Event-based characterization and simulation of sea clutter / [McDonald M.K. , Dunne D., Damini A., Kirubarajan T.] // *Proc. SPIE Signal and Data Processing of Small Targets.*— 2009.— 12 p.
32. Unsworth C.P. Improved surrogate data tests for sea clutter / Unsworth C.P., Cowper M.R., Mulgrew B., McLaughlin S. // *IEE Proc Radar. Sonar Navig.*— 2001.— №3.— p. 112—118.
33. Conte E. Modelling and simulation of non-Rayleigh radar clutter / Conte E., Longo M. , Lops M. // *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F.*— 1991.— №2.— p. 121 — 130.
34. Antipov I. Simulation of sea clutter returns / I. Antipov.— Salisbury South Australia: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998.— 67 p.
35. Maximum likelihood estimation of compound-Gaussian clutter and target parameters / Dogandzic A., Nehorai A., Wang J. // *IEEE Transactions on Signal processing.*— 2006.— №10.— p. 3884 — 3898.
36. Parsons G. Analysis of PolSAR maritime data / Parsons G., Williams C., St-Hilaire M.— Ottawa: Defence R&D, 2008.— 74 p.
37. Wetzel L.B. Sea clutter / L.B. Wetzel.— Washington: Naval Research Laboratory, 1990.— 38 p.
38. Обратное рассеяние радиоволн СВЧ и КВЧ диапазонов корабельными волнами [Текст]: дис... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03/ Горобец, Владимир Николаевич: НАН Украины, Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова.— Харьков, 2006.— 144 л.
39. Оптимизация процессов обработки радиолокационной информации в задаче распознавания надводных объектов [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.12.21/ Шапиро

Александр Абрамович: НАН Украины, Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова.— Харьков, 1997.— 195 л.

40. Система оценка параметров СВЧ радиосигналов при распространении над морем по метеорологическим измерениям [Текст]: дис... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03/ Белоброва Мария Владимировна: НАН Украины, Институт радиофизики и электроники.— Харьков, 1996.— 139 л.

41. Обратное рассеяние электромагнитного поля объектами на поверхности моря в СВЧ и КВЧ диапазонах при скользящих углах облучения [Текст]: дис... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03/ Кириченко Владимир Александрович: НАН Украины, Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова.— Харьков, 2000.— 147 л.

42. Экспериментальное исследование пространственно-временных характеристик помех от морской поверхности и неоднородностей [Текст]: дис. ... канд. техн. наук : 05.12.17/ Миронов, Владимир Александрович: Ин-т радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины.— Харьков, 2010.— 189 л.

43. Обратное рассеяние радиоволн коротковолновой части миллиметрового диапазона морской поверхностью при обрушении морских волн [Текст]: дис... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03/ Гутник Виктор Григорьевич: НАН Украины, Радиоастрономический ин-т.— Харьков, 2001.— 144 л.

44. Распространение УК радиоволн над морем [Текст]: дис...д-ра физ.-мат.наук: 01.04.03/ Иванов Виктор Кузьмич: АН Украины, Институт радиофизики и электроники.— Харьков, 1994.— 201 л.

45. 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 радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова.— Харьков, 2009.— 455 л.

46. Некоторые особенности обратного рассеяния радиоволн СВЧ диапазона гидродинамическими образованиями надводных объектов / [Гутник В.Г., Горобец В.Н., Гутник А.В., Курекин А.С.] // Радиофизика и радиоастрономия.— 2005.— №3.— с. 325—333.

47. Луценко В.И. Пространственная селекция малоразмерных надводных объектов на фоне отражений от моря / В.И. Луценко // Радиофизика и радиоастрономия.— 2005.— №2.— С. 189—201.

References

1. 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.

2. Skolnik M.I. Radar handbook / M.I. Skolnik. - New York: McGraw-Hill, 2008. - 1352 p.

3. Posner F.L. Experimental observations at very low grazing angles of high range resolution Microwave backscatter from the sea / F.L. Posner.- Washington: Naval research laboratory, 1998.- 53 p.

4. 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.

5. Long M.W. Radar reflectivity of land and sea / M.W. Long. - Boston: Artech House, 2001. - 221 p.

6. Greco M. Statistical analysis of real polarimetric clutter data at different range resolutions / Greco M., Gini F., Rangaswamy M. // IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation.- 2006.- №6.- p. 473-481.

7. Balleri A. Maximum likelihood estimation for compound-gaussian clutter with inverse gamma texture / Balleri A., Nehorai A., Wang J. // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems.- 2009.- №2.- p. 129-132.
8. Dong Y. Distribution of X-Band high resolution and high grazing angle sea clutter / Y. Dong.- Edinburgh South Australia: Defense Science Technology Organization, 2006.- 68 p.
9. Rosenberg L. Analysis of the KK-distribution with X-band medium grazing angle sea-clutter / Rosenberg L., Crisp D.J., Stacy N.J. // International Radar Conference - Surveillance for a safer world.- 2009.- 6 p.
10. Farshchian M. The Pareto distribution for low grazing angle and high resolution X-band sea clutter / M. Farshchian, F.L. Posner // IEEE Radar Conference.- 2010.- p. 789 - 793.
11. 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.] // Radar Conference - Surveillance for a Safer World, 2009. RADAR. International.- 2009.- 5 p.
12. Antipov I. Analysis of sea clutter data / I. Antipov.- Australia: Defence science and technology organization, 1998.- 40 p.
13. 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.
14. Chan C.H. Analysis of the north truro sea clutter data / C.H. Chan.- Canada: Defence Research Establishment Ottawa, 1990.- 52 p.
15. Dong Y. Statistical measures of S-band sea clutter and targets / Y. Dong, D. Merrett.- Edinburgh South Australia: Electronic Warfare and Radar Division Defence Science and Technology Organisation, 2008.- 62 p.
16. Chan H.C. Radar sea-clutter at low grazing angles / H.C. Chan // IEE proceedings - Radar and Signal Processing.- 1990.- №2.- p. 102-112.
17. Yunhan D. Clutter spatial distribution and new approaches of parameter estimation for Weibull and K-distributions / D. Yunhan.- Australia: DSTO Systems Sciences Laboratory, 2004.- 55 p.
18. Characterization of fluctuation statistics of radar clutter for Indian terrain / [Menon K.R., Balakrishnan K.N., Janakiraman M., Ramchand K.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.- 1995.- №2.- p 317 - 324.
19. Effect of changes in sea-surface state on statistical characteristics of sea clutter with X-band radar / Ishii S., Sayama S., Mizutani K. // Wireless Engineering and Technology.- 2011.- №2.- p. 175-183.
20. Hwang P.A. Breaking wave contribution to low grazing angle radar backscatter from the ocean surface / Hwang P.A., Sletten M.A., Toporkov J.V. // Journal of geophysical research.- 2008.- 12 p.
21. Raynal A.M. Doppler characteristics of sea clutter / A.M. Raynal, A.W. Doerry.- New Mexico: Sandia National Laboratories, 2010.- 38 p.
22. Lamont-Smith T. Scattering components from low grazing angle sea clutter / Lamont-Smith T., Shepherd P.W., Gates M.R. // 1st EMRS DTC Technical Conference.- 2004.- 6 p.
23. Chaotic dynamics of sea clutter / S. Haykin, S. Puthusserypady // Chaos.- 1997.- №4.- p. 777-802.
24. <http://soma.ece.mcmaster.ca/ipix/>.
25. McDonald M.K. Chaotic sea clutter returns / M.K. McDonald.- Ottawa: Defence Research Establishment, 2001.- 54 p.
26. Unsworth C.P. False detection of chaotic behaviour in the stochastic compound K-distribution model of radar sea clutter / Unsworth C.P., Cowper M.R., McLaughlin, B.

Mulgrew S. // Proc. of the 10th IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Processing.- 2000.- №10.- p. 296-300.

27. McDonald M.K. Limitations of non-linear dynamics in predicting sea clutter returns / M.K. McDonald, A. Damini.- Ottawa: Defence R&D, 2002.- 26 p.

28. Jing Hu Power-law sensitivity to initial conditions in sea clutter / Jing Hu, Jianbo Gao, Kung Yao // IEEE 2005 International Radar Conference.- 2005.- p. 956-961.

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

30. Jing Hu A new way to model nonstationary sea clutter / Jing Hu, Wen-wen Tung, Jianbo Gao // IEEE Signal Processing Letters.- 2009.- №2.- p. 129-132.

31. Event-based characterization and simulation of sea clutter / [McDonald M.K. , Dunne D., Damini A., Kirubarajan T.] // Proc. SPIE Signal and Data Processing of Small Targets.- 2009.- 12 p.

32. Unsworth C.P. Improved surrogate data tests for sea clutter / Unsworth C.P., Cowper M.R., Mulgrew B., McLaughlin S. // IEE Proc Radar. Sonar Navig.- 2001.- №3.- p. 112-118.

33. Conte E. Modelling and simulation of non-Rayleigh radar clutter / Conte E., Longo M. , Lops M. // Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F.- 1991.- №2.- p. 121 - 130.

34. Antipov I. Simulation of sea clutter returns / I. Antipov.- Salisbury South Australia: DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, 1998.- 67 p.

35. Maximum likelihood estimation of compound-Gaussian clutter and target parameters / Dogandzic A., Nehorai A., Wang J. // IEEE Transactions on Signal processing.- 2006.- №10.- p. 3884 - 3898.

36. Parsons G. Analysis of PolSAR maritime data / Parsons G., Williams C., St-Hilaire M.- Ottawa: Defence R&D, 2008.- 74 p.

37. Wetzel L.B. Sea clutter / L.B. Wetzel.- Washington: Naval Research Laboratory, 1990.- 38 p.

38. Obratnoie rasseianie radiovoln SVCH i KVCH diapazonov korabelnymi volnami [Tekst]: dis...kand. fiz.-mat. nauk: 01/04/03/ Horobets Vladimir Nikolaievich: NAN Ukrainy, Institut radiofiziki i eliektroniki im. A. Ya. Usikova.-Kharkov, 2006.-144 l..

39. Optimizatsyia protsessov obrabotki radiolokatsyonnoi informatsii v zadachie raspoznavania navodnykh obektov [Tekst]: dis...kand. tekhn. nauk: 05.12.21/Shapiro Aleksandr Abramovich: NAN Ukrainy, Institut radiofiziki i elektroniki im. A. Ya. Usikova.-Kharkov, 1977/-195 l..

40. Sistiema otsenki paranetrov SVCH radiosihnalov pri raspostranienii nad morem po mateorolohichieskim izmereniiam [Tekst]: dis...kand. fiz.-mat. nauk:01/04/03/ Belobrova Mariia Vladimirovna: NAN Ukrainy, Institut radiofiziki i eliektroniki im. A. Ya. Usikova.-Kharkov, 1996.-139 l.

41. Obratnoie rasseianie elektromahnitnoho polia obektami na poverkhnosti moria v SVCH i KVCH diapazonakh pri skolziashchikh uhlakh obluchenia [Tekst]: dis...kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.03/ Kirichenko Vladimir Aleksandrovich: NAN Ukrainy, Institut radiofiziki i eliektroniki im. A. Ya. Usikova.-Kharkov,2000. -147 l.

42. Eksperimentalnoie issliedovanie prostranstvenno-vriemiennykh kharakteristik pomekh ot morskoi poverkhnosti i neodnostoronnostiei [Tekst]: dis...kand. tekhn. nauk:05.12.17/ Mironov Vladimir Aleksandrovich: In-t radiofiziki i eliektroniki im. A. Ya. Usikova: NAN Ukrainy.- Kharkov, 2010.-189 l..

43. Obratnoie rasseianiie radiovoln korotkovolnovoi chasti milimetrovoho diapazona morskoi poverkhosiu pri obrushenii morskikh voln [Tekst]: dis...kand. fiz.-mat. nauk: 01/04/03/ hutnik Viktor Hrihorievich: NAN Ukrainy, Radioastronomicheskii in-t.- Kharkov, 2001.-144 l.

44. Raspostranieniie UK radiovoln nad morem [Tekst]: dis...d-ra fiz.-mat. nauk: 01.04.03/ Ivanov Viktor Kyzmich: NAN Ukriny, Institut radiofiziki i eliektroniki im. A. Ya. Usikova.-Kharkov, 1994.- 201 l.

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

46. Nekotoryie osobennosti obratnogo rassieianiia radiovoln SVCH diapazona hadrodinamichieskimi obrazovaniiami nadvodnukh obektov/ [Hutnik V.H., Horobets V.N., Hutnik A.V., Kurekin A.S.]/ Radiofizika i radioastronomia.- 2005.- №3.- s. 325-333.

47. Lutsenko V.I. Prostranstviennaia sieliektsyia malorazmiernukh nadvodnykh obektov na fonie otrazheniia ot moria/ V.I. Lutsenko// Radiofizika i radioastronomia.- 2005.- №2.- s. 189-201

Мрачковський О. Д., Турко С. І. Основні характеристики морського клатера, що впливають на виявлення малорозмірних малорухомих цілей морськими РЛС. В роботі здійснюється пошук математичної моделі морського клатера, придатної для створення на її основі алгоритму виявлення малорозмірних малорухомих цілей морськими РЛС. В результаті аналізу джерел для моделювання стохастичного розподілу амплітуди морського клатера обирається компонована Гаусова модель, оскільки її адекватність підтверджена найбільшою кількістю дослідників. В якості перспективної альтернативи стохастичній моделі обирається обговорювана в останнє десятиліття в літературі модель, основана на теорії хаосу, перевага використання якої для вирішення даного класу задач потребує остаточного підтвердження або заперечення.

Ключові слова: морський клатер, К-розподіл, резонансне розсіювання, компонована модель, текстура, спекл, спайки, аттрактор, показник Ляпунова.

Мрачковский О. Д., Турко С. И. Основные характеристики морского клатера, влияющие на обнаружение малоразмерных малоподвижных целей морскими РЛС. В работе осуществляется поиск математической модели морского клатера, пригодной для создания на ее основе алгоритма обнаружения малоразмерных малоподвижных целей морскими РЛС. В результате анализа источников для моделирования стохастического распределения амплитуды морского клатера избирается составная Гауссова модель, поскольку ее состоятельность подтверждена наибольшим количеством исследователей. В качестве перспективной альтернативы стохастической модели избирается обсуждаемая в литературе модель, основанная на теории хаоса, преимущество использования которой для решения данного класса задач требует окончательного подтверждения или отрицания.

Ключевые слова: морской клатер, К-распределение, резонансное рассеяние, составная модель, текстура, спекл, спайки, аттрактор, показатель Ляпунова.

Mrachkovskiy O. D., Turko S. I. Main sea clutter characteristics impacting small slow moving targets detection by marine radars. Searching of the sea clutter mathematical model is carried out in this paper. It is suitable to create based on it algorithm for small slow moving targets detection by marine radars. The compound Gaussian model for modeling sea clutter amplitude stochastic distribution is selected as a result of the sources analysis, because it was confirmed by most of researches. The discussed in the literature model based on chaos theory is choosen as perspective alternative for stochastic model; its advantage of using it for such problems solution must be definitively proved or denied.

It was proposed many different distributions for high resolution sea clutter amplitude data modeling. The most frequently reported in the literature are K, Log-Normal and Weibull distributions. K distribution belonging to a compound-Gaussian model has the most significant theoretical and experimental background. This distribution choice is physically explained basing on the processes taking place when electromagnetic waves scattered from capillarity and gravity sea waves create a composed echo. Signal representing this echo is the product of two random components, called texture and speckle.

Texture is the result of scattering from gravity waves, has a Gamma pdf (in case of K distribution) and corresponds to slow-varying large-scale structure. Speckle is the result of scattering from isolated scatterers (capillarity waves), has a Rayleigh pdf and corresponds to rapid varying small-scale structure. So, K distribution envelope is a compound distribution consisting of a locally Rayleigh distribution speckle whose mean is modulated by a gamma distribution texture. All researches consider Rayleigh pdf for speckle. The lognormal, generalized Gaussian, inverse gamma and some other distributions were proposed for the texture. Due to literature analyses it is seen that texture distribution depends on radar range resolution, but strong dependence is not proved. Some scientists modified K distribution to K-A distribution consisting of the Rayleigh, gamma and Poisson distributions to describe better spikes appearance caused by whitecaps and bursts. Using of Weibull-Weibull (WW) and KK distributions was proposed for high grazing angle and high resolution sea clutter.

Doppler characteristics of the sea clutter has been investigated by many researchers and now we have well developed theory. It is known empirical behavior of sea clutter doppler spectrum for different conditions – grazing angle, resolution, wind speed, polarisation and others. Lee, Walker and Ward models are used for sea clutter doppler spectrum describing. Fast moving targets can be effectively detected in heavy sea clutter by doppler radars. But existing theory cannot improve detection of slow moving small targets in heavy sea clutter, because slow moving targets have doppler shift compared to doppler shift of sea clutter. Correlation properties of high resolution sea clutter cannot be derived from its doppler spectrum.

In alternative to stochastic model, many researches prefer deterministic model and use chaos theory to describe sea clutter. This choice is based on the fact that both hydrodynamic and electromagnetic theory relying on deterministic models only. If deterministic theory usefulness in applying to high resolution sea clutter description be proved completely, it can lead to great progress for small targets in heavy sea clutter detection; because in this case sea clutter behavior can be predicted if initial conditions are precisely known. Using chaotic model for high resolution sea clutter description is highly disputed in recent years, and many researches have questioned first results of high resolution sea clutter describing with chaotic theory usage by Haykin.

But great possibilities can give deterministic model for small targets detection definitively proving its ability to describe high resolution sea clutter data precisely causes different scientists to return to chaos theory again and again. Promising results in this field was obtained by using multifractal theory, but still there are not strong methodological background of using deterministic models for small slow moving targets in sea clutter detection, so it is required to make research to prove or deny deterministic models usefulness for high resolution sea clutter data description.

Keywords: *sea clutter, K-distribution, resonant scattering, compound model, texture, speckle, spikes, attractor, Lyapunov exponent.*