УДК 623.55.021:621.396.96.3

С. М. РОЗГОНАЄВ,
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
П. П. ЧАБАНЕНКО, *доктор воєнних наук, професор, заслужений діяч науки й техніки України*
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

Підвищення інформативності й інваріантності класифікаційних ознак перевипромінюваних радіолокаційних сигналів надводним кораблем

Проведено дослідження з підвищення ефективності класифікації й визначення головної цілі за сигналами радіолокаційних датчиків при невизначеному ракурсі опромінення надводного корабля.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіювання, надводний корабель, інваріантність, амплітуда, тривалість імпульсів.

Проведены исследования по повышению эффективности классификации и выделения главной цели радиолокационными датчиками с учетом ракурса облучения корабля.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеивания, надводный корабль, инвариантность, амплитуда, длительность импульсов.

Класифікація морських цілей за сигналами радіолокаційного датчика (радіолокаційної станції виявлення, радіотехнічного пристрою самонаведення протикорабельної ракети з імпульсним випромінюванням) ускладнена з низки причин. При форсованих характеристиках датчика основні з них такі:

сильний вплив підстильної морської поверхні, характер схвильованості якої від штилю до шторму заздалегідь невідомий, та інших природних перешкод;

залежність параметрів перевипромінюваного надводним кораблем сигналу від ракурсу опромінення, курсу й орієнтації корпуса.

У зв'язку з цим обробка сигналу ускладняється суперечливими умовами врахування невизначеного розміщення корабля на момент його опромінення й сукупністю випадкових факторів, що впливають на параметри відбитого сигналу.

Характерною рисою надводних кораблів (НК) є співвідношення його розмірів у перерізах, проілюстрованих на рис. 1.

При опроміненні з траверзних курсових кутів (по осі *а – а*) час проходження фронту електромагнітної хвилі по кораблю малий, а площа проекції корабля на поверхню її фронту (вид збоку) більша. При опроміненні з курсових/кормових напрямків (по осі *в*) час проходження фронту хвилі більше, але площі проекції корабля на її фронт (вид з корми/носа) менше. У проміжних положеннях корабля ці величини змінюються так, що при збільшенні однієї зменшується інша.

Архітектури надводних кораблів різні, площі їхніх геометричних проекцій не збігаються з ефективною поверхнею розсіювання, а тривалість відбитих сигналів складається з тривалості зондувального імпульсу й добавки на тангенціальний розмір цілі (у напрямку зондування). Тому фізична картина явища істотно складніша геометричних співвідношень і відзначену закономірність впливу конструкції надводних кораблів важко виявити у перевипромінюваних ними сигналах [1] та використати для досягнення інваріантності комбінації амплітуди U і тривалості T імпульсів від цілі при їхній обробці. Так, пропозиція підсумувати амплітуду U з тривалістю імпульсу T на фіксованому рівні половини його амплітуди ($U + km_{0,5}$) дало тільки частковий й явно недостатній ефект. Це ж стосується до інших емпіричних спроб запропонувати інваріантну їхню комбінацію. Незважаючи на відсутність явного ефекту, дослідження в цьому відношенні актуальні, тому що геометричні пропорції корпуса НК типові й повинні проявляти себе в параметрах перевідбитих сигналів радіолокаційних датчиків, особливо при малих кутах місця й коротких імпульсів зондування НК, побудованих за сучасною технологією.

Оцінювання інформації про клас НК у перевипромінюваних сигналах. Підвищення ефективності класифікації й виділення головної цілі пов'язане з оптимальним накопиченням прийнятих від цілі сигналів, формуванням достатніх статистик. Відомо, що при певних законах розподілу $\omega_j(x)$ випадкової ознаки X об'єкта класу j логарифм відносної

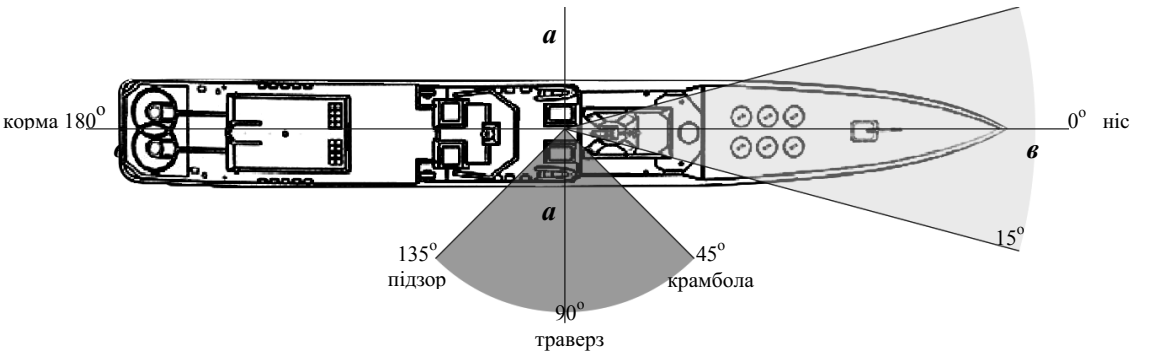

Рис. 1. Вид зверху й сектори курсових кутів багатоцільового корабля

правдоподібності $\lambda_{12}(x_i) = \ln[\varpi_1(x)/\varpi_2(x)]$. При деякому об'ємі *n* вибірки $i = \overline{1,n}$ даних накопичення інформації здійснюється підсумовуванням значень $\lambda_{12}(x_i)$ щодо об'єкта невідомого класу із щільністю ознаки $\omega_j(x)$:

$$\Delta I_j^* = \sum_{i=1}^{n} \omega_j(x) \ln \frac{\varpi_1(x)}{\varpi_2(x)} \quad .$$

Граничним виразом цієї суми при $n \to \infty$ і $j = 1$ буде *спрямована розбіжність* [2]

$$\Delta I_{12} = \lim_{n\to\infty} \sum_{i=1}^{n} \omega_1(x_i) \ln \frac{\varpi_1(x_i)}{\varpi_2(x_i)} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(x) \ln \frac{\varpi_1(x)}{\varpi_2(x)} dx, \quad (1)$$

яку запишемо у вигляді різниці

$$\Delta I_{12} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(x) \ln \varpi_1(x)\, dx - \int_{-\infty}^{\infty} \omega_1(x) \ln \varpi_2(x)\, dx.$$

У цьому виразі перший інтеграл характеризує [3] кількість інформації, яку отримуємо при повному з'ясуванні класу 1 об'єкта 1. Другий інтеграл можливо інтерпретувати як кількість змістовної інформації в об'єкті 1 про об'єкти класу 2. Їхня різниця – міра інформації, що за класифікаційною ознакою *X* об'єкт класу 1 відрізняє від об'єкта класу 2. Аналогічно спрямована розбіжність

$$\Delta I_{21} = \int_{-\infty}^{\infty} \omega_2(x) \ln \frac{\varpi_2(x)}{\varpi_1(x)} dx \quad (2)$$

може інтерпретуватися як кількість інформації, що за цією класифікаційною ознакою об'єкт класу 2 відрізняє від об'єкта класу 1.

Сума спрямованих розбіжностей – міра, що досліджена С. Кульбаком, задовольняє двом першим аксіомам відстані (*позитивності й симетрії*), але не задовольняє аксіомі *трикутника*, і тому названа ним "*статистичною відстанню*" [2]:

$$I = \Delta I_{12} + \Delta I_{21} \quad . \quad (3)$$

Стосовно завдання класифікації морських цілей будемо інтерпретувати цю міру як "розрізнювальну інформацію" ознаки *X* при порівнянні класів НК. В якості ознаки доцільно прийняти амплітуду *U* і тривалість імпульсу *T* перевідбитого цілі радіолокаційного імпульсу, застосовуючи до них міру (3) для оцінки їхньої інформативності.

При допущенні про незалежність величин *U*, *T* спільний їхній розподіл $\varpi(u,\tau) = \varpi(u) \cdot \varpi(\tau)$ має вигляд

$$\varpi(u,\tau) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_\tau} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(u-m_u)^2}{\sigma_u^2} + \frac{(\tau-m_\tau)^2}{\sigma_\tau^2}\right]}, u\epsilon U, \tau\epsilon T, \quad (4)$$

де m_u, m_τ – математичне сподівання випадкових величин *U, T;* $\sigma_u^2 = D_u, \sigma_\tau^2 = D_\tau$ – їх дисперсії.

Клас НК може оцінюватися попарним перебором можливих класів цілей. При двох класах *j = 1; 2* спрямовану розбіжність (1) запишемо як

$$\Delta I_{12} = \iint_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u,\tau)\ \ln \frac{\varpi_1(u,\tau)}{\varpi_2(u,\tau)}\, du d\tau. \quad (5)$$

Тут

$$\ln \frac{\varpi_1(u,\tau)}{\varpi_2(u,\tau)} = \frac{1}{2}\left[\frac{(u-m_{u2})^2}{D_{u2}} + \frac{(\tau-m_{\tau2})^2}{D_{\tau2}} - \frac{(u-m_{u1})^2}{D_{u1}} - \frac{(\tau-m_{\tau1})^2}{D_{\tau1}} + \ln\frac{D_{u2}D_{\tau2}}{D_{u1}D_{u2}}\right],$$

де індекси 1, 2 співвіднесені параметрам розподілів ознак порівнюваних класів.

Після перетворень одержимо

$$\ln \frac{\varpi_1(u,\tau)}{\varpi_2(u,\tau)} = \frac{D_{u1}-D_{u2}}{2D_{u1}D_{u2}}u^2 + \frac{m_{u1}D_{u2} - m_{u2}D_{u1}}{D_{u1}D_{u2}}u + \frac{D_{\tau1}-D_{\tau2}}{2D_{\tau1}D_{\tau2}}\tau^2 + \frac{m_{\tau1}D_{\tau2} - m_{\tau2}D_{\tau1}}{D_{\tau1}D_{\tau2}}\tau + c_{u1} + c_{\tau1}, \quad (6)$$

де

$$c_{u1} = \frac{1}{2}\left(\frac{m_{u2}^2}{D_{u2}} - \frac{m_{u1}^2}{D_{u1}} + \ln\frac{D_{u2}}{D_{u1}}\right),\ c_{\tau1} = \frac{1}{2}\left(\frac{m_{\tau2}^2}{D_{\tau2}} - \frac{m_{\tau1}^2}{D_{\tau1}} + \ln\frac{D_{\tau2}}{D_{\tau1}}\right).$$

Позначимо параметричні співмножники при змінних у (6) через a_{u1}, b_{u1} і $a_{\tau1}, b_{\tau1}$ відповідно порядку і запишемо простіше:

$$\ln\frac{\varpi_1(u,\tau)}{\varpi_2(u,\tau)} = (a_{u1}u^2+b_{u1}u+c_{u1}) + \\ +(a_{\tau1}\tau^2+b_{\tau1}\tau+c_{\tau1}) = \varphi(u)+\varphi(\tau)\ . \quad (7)$$

Введемо (7) в (5):

$$\Delta I_{12} = \iint_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u,\tau)\varphi_1(u)\,du d\tau + \iint_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u,\tau)\varphi_1(\tau)\,d\tau du, \quad (8)$$

де перший інтеграл перетвориться в такий спосіб:

$$I_{u1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u)(a_{u1}u^2+b_{u1}u+c_{u1})\,du \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(\tau)\,d\tau = \\ = a_{u1}(m_{u1}^2+D_{u1}) + b_{u1}m_{u1} + c_{u1}, \quad (9)$$

і аналогічно другий інтеграл

$$I_{\tau1} = \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(\tau)(a_{\tau1}\tau^2+b_{\tau1}\tau+c_{\tau1})\,d\tau \int_{-\infty}^{\infty} \varpi_1(u)\,du = \\ = a_{\tau1}(m_{\tau1}^2+D_{\tau1}) + b_{\tau1}m_{\tau1} + c_{\tau1}. \quad (10)$$

Отже, спрямована розбіжність (8) у вигляді суми доданків характеризує інформацію в першому класі $(j=1)$ морських цілей про другий їхній клас $(j=2)$, яка міститься в амплітуді U імпульсу і його тривалості T:

$$\Delta I_{12} = I_{u1} + I_{\tau1}\ . \quad (11)$$

Аналогічно одержимо сумарну інформацію у вигляді спрямованої розбіжності

$$\Delta I_{21} = I_{u2} + I_{\tau2}\ , \quad (12)$$

яка характеризує внесок амплітуди й тривалості імпульсу у відмінність другого класу $(j=2)$ морських цілей від першого $(j=1)$ їхнього класу. Тут вирази для доданків збігаються з (9) і (10) при заміні індексу 1 на індекс 2. Це ж стосується й індексів при параметрах у (6).

Додавання (11) з (12) дає ***розрізнювальну інформацію*** *про порівнювані класи морських цілей, яка потенційно міститься в амплітуді й тривалості перевипромінюваних ними зондувальних імпульсів*, що може бути представлена, на відміну від (3), так:

$$I = (I_{u1}+I_{u2}) + (I_{\tau1}+I_{\tau2}) = I_u + I_\tau\ . \quad (13)$$

Тут

$$I_{uj} = a_{uj}\left(m_{uj}^2+D_{uj}\right) + b_{uj}m_{uj} + c_{uj}\ , \qquad j=1,2 \quad (14)$$

де коефіцієнти визначені в (6) для $j = 1$, а при $j = 2$ виконується переіндексація параметрів. Підстановкою виразів коефіцієнтів у (14) одержимо

$$a_{u1}(m_{u1}^2+D_{u1}) + a_{u2}(m_{u2}^2+D_{u2}) = \\ = [(D_{u1}-D_{u2})(m_{u1}^2+D_{u1}) + (D_{u2}-D_{u1})(m_{u2}^2+D_{u2})]/2\,D_{u1}D_{u2} = \\ = [(D_{u1}-D_{u2})(m_{u1}^2-m_{u2}^2) + (D_{u2}-D_{u1})^2]/2D_{u1}D_{u2}\ ;$$

$$b_{u1}m_{u1} + b_{u2}m_{u2} = [(m_{u1}D_{u2}-m_{u2}D_{u1})m_{u1} + \\ + (m_{u2}D_{u1}-m_{u1}D_{u2})m_{u2}]/D_{u1}D_{u2} = \\ = (m_{u1}D_{u2}-m_{u2}D_{u1})(m_{u1}-m_{u2})/D_{u1}D_{u2};$$

$$C_{u1} = C_{u2} = 0\ .$$

Підставляючи ці вирази в (14) і підсумовуючи їх, після перетворювання знаходимо розрізнювальну інформацію, яка міститься в **амплітуді** імпульсів про порівнювані класи цілей у мірі Кульбака при нормальному їхньому розподілі:

$$I_u = \frac{(m_{u1}-m_{u2})^2(D_{u1}+D_{u2}) + (D_{u1}-D_{u2})^2}{2D_{u1}D_{u2}}, u \in U. \quad (15)$$

Такі ж перетворення дають I_τ, співпадаючи з (15) при заміні u на $\tau \in T$ як міру інформації про класи цілей, яка міститься в **тривалості** перевідбитих імпульсів. Отримані вирази вводяться в (13), чим визначається потенційна інформація про порівнювані класи надводних кораблів, що міститься в амплітуді U і тривалості T перевипромінюваних ними радіолокаційних імпульсів: $I = I_u + I_\tau$.

Перепишемо (15) без буквених індексів:

$$I(m,D) = \frac{(m_1-m_2)^2(D_1+D_2) + (D_1-D_2)^2}{2D_1D_2}\ . \quad (16)$$

При рівних дисперсіях класифікаційної ознаки з (16) треба

$$I(m) = \frac{(m_1-m_2)^2}{D}\ , \quad (17)$$

а в іншому крайньому випадку – рівності математичних сподівань ознаки – має місце

$$I(D) = \frac{(D_1-D_2)^2}{2D_1D_2}\ . \quad (18)$$

Ці вирази можливо використати для зіставлення з повною розрізнювальною інформацією класифікаційної ознаки $I(m,D)$ параметричних складових: *систематичної* $I(m)$ і *випадкової* $I(D)$. Вирази для них несуперечливо інтерпретуються згідно з інтуїтивним поданням про характер досліджуваного явища, його природу.

Зазначимо, що в акваторії Чорноморського й Азовського морів *більше 80%* становлять кораблі двох класів: корвет і фрегат (і співвіднесені до цих класів НК, за винятком патрульних кораблів). Тому найціннішим для практики є результати експериментального дослідження характеристик надводних кораблів цих двох класів.

Виявлення квазіоптимальної комбінованої ознаки класифікації НК. Зниженню ступеня залежності класифікаційної ознаки від ракурсу опромінення НК може послужити перехід до використання функції випадкових амплітуди й тривалості імпульсів морської

цілі як яка відзначалася комбінація $Z = U + kT_{0,5}$, запропонована В.Барсковим і реалізована в авіації ВМС із частковим ефектом. При цьому завдання оцінки інформативності цієї комбінації не ставилося.

Вище показано, що розрізнювальна інформація (13) як гранична форма достатніх статистик є сумою інформації про клас цілі, що міститься у вибірці амплітуд I_u і тривалостей I_τ перевипромінюваних імпульсів. Відомо також, що достатня статистика є сумою функцій від значень випадкових величин. У розглянутому випадку нормально розподілених випадкових ознак *U* й *T* вище показано, що достатні статистики формуються на основі логарифма відношення правдоподібності у вигляді суми (7) двох поліномів, яку запишемо без вільних членів:

$$(a_u u^2 + a_\tau \tau^2) + (b_u u + b_\tau \tau) = Z(u, \tau). \qquad (19)$$

Комбінація $Z(u,\tau)$ задовольняє вимозі збереження всієї інформації, що міститься в одиничній вибірці даних системи незалежних нормально розподілених ознак (*U, T*). При цьому в другій дужці підсумовуються зважені значення змінних, а в першій – зважені їхні квадрати. З урахуванням конструктивних особливостей надводних кораблів (рис. 1) правдоподібно очікувати меншого ступеня залежності Z від ракурсу їхнього опромінення, чим у частинних змінних u і τ. Ще однією перевагою комбінації (19) перед лінійною функцією $U + kT$ є визначеність коефіцієнтів у (6), що обчислюються через моментні характеристики випадкових амплітуди й тривалості перевипромінювальних кораблями порівнюваних класів радіолокаційних імпульсів. При відомих параметрах розподілів значення цих коефіцієнтів можливо обчислити заздалегідь.

Накопичення комбінації ознак імпульсів від цілі здійснюється підсумовуванням її значень з нормуванням по обсягу вибірки даних:

$$Z_n = a_u \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i^2 + a_\tau \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \tau_i^2 + b_u \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i \qquad (20)$$

де нормовані по *n* суми – достатні статистики (оцінки других і перших моментів амплітуди й тривалості імпульсів від корабля, клас якого визначається).

Висновки:

1. Таким чином, запропонована комбінована ознака класифікації НК відрізняється від раніше запропонованих тим, що накопичується вся інформація про клас цілі, яка міститься у вибірці системи (*U*, *T*) ознак, і при цьому має часткову інваріантність до ракурсу опромінення корабля.

2. Продовження досліджень відносно інформативності й інваріантності параметрів перевипромінюваних радіолокаційних сигналів надводним кораблем пов'язане з натурними експериментами.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Китай Я. Г., Кряжевський О. П., Кузьмін В. О. Пристрої виявлення і розпізнавання морських цілей у радіотехнічних системах. Севастополь : СВМІ, 2003. 43 с.
2. Кульбак С. Теория информации и статистики. М., 1967. 408 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.

Рецензент В. І. Слюсар, д-р техн. наук, проф.
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)