

УДК 535.3

О.В. Карпенко, В.В. Онищенко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## СИНТЕЗ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ

В статті розглядаються питання радіолокаційного виявлення та розпізнавання цілей за радіолокаційним портретом (РЛП), який являє собою розподіл комплексних амплітуд відбитого сигналу за елементами розділення цілі. Запропонована багатоканальна система радіолокаційного розпізнавання, яка приймає рішення шляхом порівняння параметрів реальних цілей з апріорно заданими моделями.

**Ключові слова:** радіолокаційний портрет, образ цілі, роздільність, класи розпізнавання, поляризаційна матриця розсіяння, радіус частотної кореляції, комплексна амплітуда, критерій мінімуму середнього ризику, відношення правдоподібності.

### Вступ

Поряд з задачами виявлення цілей та вимірювання координат і параметрів руху, однією з важливих задач радіолокаційного спостереження є задача радіолокаційного розпізнавання, яка полягає у встановленні приналежності цілі певному класу [1 – 4, 6].

Процес класифікації визначається ознаками або параметрами цілей, такими як: дальність, швидкість, кутові координати, відбиваність поверхні цілі, просторова орієнтація, геометричні розміри та багатомірні РЛП (далекомірний, картинний і швидкісний). При цьому координати та параметри руху цілей (дальність, швидкість, азимут та кут місця) відіграють другорядну роль.

З точки зору розпізнавання цілей певну інформативність має потужність відбитого сигналу. Порівняння за інтенсивністю сигналів, відбитих від декількох рівновіддалених цілей, дозволяє зробити висновок про наявність цілі з малою або великою ефективною відбивальною поверхнею. Разом з цим інтенсивність відбитого сигналу не дає можливості прийняти рішення про розмір цілі.

Більшу інформативність розпізнавання мають поляризаційні параметри відбитого сигналу, а саме поляризаційна матриця розсіяння (ПМР), яка встановлює співвідношення потужностей ортогональних поляризаційних компонентів відбитого сигналу в лінійному або круговому базисі в залежності від поляризаційних характеристик зондувального сигналу.

ПМР цілі, яка отримана в процесі її радіолокаційного спостереження, дозволяє зробити висновок щодо орієнтації цілі у просторі та про співвідношення її горизонтального та вертикального розмірів у картинній площині.

Геометричні розміри цілі в процесі її радіолокаційного спостереження можуть бути визначені з використанням резонансних властивостей цілі, а також частотних властивостей, пов'язаних з поняттям радіусу частотної кореляції (РЧК). Резонансні властивості проявляються у помітному збільшенні її

ефективної відбивальної поверхні, а відповідно, й інтенсивності відбитого сигналу, якщо розміри цілі кратні половині довжини опромінювальної хвилі.

Під РЧК цілі мається на увазі таке рознесення за частотою зондувальних сигналів, коли відбиті на цих частотах сигнали стають практично незалежними. РЧК буде обернено пропорційним до радіальних розмірів цілі.

Перелічені вище ознаки можуть бути визначені за умов простого розрізнення цілей у просторі радіолокаційного спостереження. Більш складними категоріями, що забезпечують збільшення інформативності розпізнавання, є РЛП, які відображають образ цілі. Отримання РЛП можливе лише за умов розрізнення елементів образу цілі.

Під образом цілі мається на увазі розподіл її відбивних властивостей за однією або декількома координатами. Образ цілі не залежить від властивостей зондувального сигналу (часових, частотних, просторових і поляризаційних), а залежить лише від цілі з урахуванням орієнтації її у просторі відносно радіолокаційної станції (РЛС).

Далекомірний і картинний образи відповідають уявленням про радіальний розподіл та розподіл в картинній площині відбивних властивостей поверхні цілі в оптичному діапазоні. Швидкісний образ враховує розподіл за радіальною швидкістю елементарних відбивачів поверхні цілі, які здійснюють під час руху як регулярне (поступальне або обертальне) переміщення, так і хаотичне, що обумовлене різними випадковими факторами.

Повною трансформацією швидкісного образу цілі в частотну зону є спектр відбитого від цілі сигналу за умов монохроматичного зондувального сигналу. В результаті переміщення елементів конструкції цілі формується складний спектр відбитого сигналу з основною планерною спектральною складовою та характерними для кожної цілі бічною складовою, які у сукупності є частотним образом цілі.

РЛП являє собою розподіл комплексних амплітуд відбитого сигналу за елементами розділення ці-

лі. З покращенням роздільності РЛП наближається до образу цілі. Таким чином, РЛП сприймається як спотворений образ цілі, причому ступінь спотворення залежить від того інструменту, за допомогою якого виконується портрет. Таким інструментом є зондувальний сигнал, його частотно-часові та просторові характеристики. Чим більше ширина спектру модуляції зондувального сигналу, тим точніше далекомірний портрет буде нагадувати далекомірний образ. Чим ближче зондувальний сигнал буде до монохроматичного, тим точніше буде відтворений частотний (швидкісний) образ. Підвищення ж роздільності РЛС за кутовими координатами сприяє точності відтворення образу цілі в картинній площині.

Кожен РЛП можна подати як сукупність  $N$  нормально розподілених статистично незалежних комплексних амплітуд  $\eta_i$ , розподіл квадратів модулів яких  $|\eta_i|^2$  відповідає розподілу потужності відбитого сигналу.

Мірність РЛП визначається числом елементів образу цілі. За ефективною відбивальною поверхнею, резонансними, частотно-кореляційними, флуктуаційними, поляризаційними властивостями та характеристиками можуть бути введені відповідні РЛП. Отже, задача радіолокаційного розпізнавання зводиться до розпізнавання образів за РЛП цілей.

**Метою статті** є синтез багатоканальної системи радіолокаційного розпізнавання, яка б приймала рішення шляхом порівняння параметрів реальних цілей з апріорно заданими моделями.

### Результати досліджень

Задача виявлення є двоальтернативною, тобто може бути прийнято одне з двох рішень: наявність цілі, або її відсутність. На відміну від неї, задача розпізнавання є багатоальтернативною, оскільки вноситься рішення про приналежність цілі до одного з  $M$  класів.

Рішення задачі виявлення за критерієм мінімуму середнього ризику [5] призводить до необхідності порівняння відношення правдоподібності

$$\Lambda = \frac{p_1(f)}{p_0(f)}, \quad (1)$$

з порогом

$$\Lambda_* = \frac{P(A_0)(C_{10} - C_{00})}{P(A_1)(C_{01} - C_{11})}, \quad (2)$$

який залежить від апріорних ймовірностей наявності  $P(A_1)$  та відсутності  $P(A_0)$  цілі та цін  $C_{k\ell}$  прийняття  $k$ -го рішення, хоча в дійсності має місце  $\ell$ -та умова.

У (1) і (2):  $p_1(f)$  – густина ймовірності за умов  $A_1$  (наявність цілі);  $p_0(f)$  – густина ймовірності за умов  $A_0$  (відсутність цілі);  $C_{11}$  – ціна правильного

виявлення;  $C_{01}$  – ціна пропуску цілі;  $C_{10}$  – ціна хибної тривоги;  $C_{00}$  – ціна правильного виявлення.

Якщо вважати, що ціни за правильне рішення дорівнюють нулю ( $C_{00} = C_{11} = 0$ ), а ціни за помилкові рішення є однаковими ( $C_{10} = C_{01}$ ), то розв'язувальне правило буде виглядати наступним чином: якщо  $\Lambda \geq \Lambda_*$ , то приймаємо рішення  $A_1^*$  (ціль присутня), інакше, якщо  $\Lambda < \Lambda_* - A_0^*$  (ціль відсутня).

Аналогічно, при вирішенні багатоальтернативної задачі розпізнавання з позицій мінімального середнього ризику, алгоритм розпізнавання визначається наступним чином:

$$\text{якщо } \Lambda_{k\ell} = \frac{p_k(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)}{p_\ell(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)} \geq \frac{P_k}{P_\ell}, \quad \forall \ell \neq k, \text{ то } A_k^*,$$

$$\text{якщо } \Lambda_{k\ell} < \frac{P_k}{P_\ell}, \quad \forall \ell \neq k, \text{ то не } A_k^*,$$

де  $p_k(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)$  – багатомірна густина ймовірності комплексних амплітуд  $\eta_i$  цілей  $k$ -го класу;  $p_\ell(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)$  – багатомірна густина ймовірності комплексних амплітуд  $\eta_i$  цілей  $\ell$ -го класу;  $P_k$  та  $P_\ell$  – апріорні ймовірності появи цілей  $k$ -го та  $\ell$ -го класів відповідно.

Якщо апріорні ймовірності появи цілей різних класів вважати однаковими ( $P_k = P_\ell$ ), то правило рішення можна задати у вигляді:

$$\text{якщо } \Lambda_{k\ell} = \frac{p_k(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)}{p_\ell(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n)} > 1, \quad \forall \ell \neq k, \text{ то } A_k^*. \quad (3)$$

Процедура прийняття рішення відповідно цього алгоритму полягає у наступному. Виконується обробка комплексних амплітуд  $\eta_i$  РЛП у відповідності до правила (3). Номер  $k$ , для якого відношення вірогідності виявиться більшим за одиницю для усіх  $\ell \neq k$ , буде номером гіпотези, яку можна прийняти з найменшим середнім ризиком.

Таким чином, рішення приймається на основі послідовної перевірки усіх гіпотез шляхом порівняння кожної з них з усіма іншими.

Для того, щоб з найменшим ризиком відповісти на питання про наявність цілі 1-го класу, необхідно перевірити відношення правдоподібності  $\Lambda_{1\ell}$  для усіх  $\ell \neq 1$  (їх число дорівнює  $M-1$ ).

Якщо усі  $\Lambda_{1\ell}$  виявляться більше за одиницю, то з найменшим середнім ризиком слід прийняти гіпотезу про наявність цілі 1-го класу.

У разі, якщо нерівності не виконуються, аналогічним чином перевіряються відношення правдоподібності  $\Lambda_{2\ell}$  ( $\ell \neq 2$ ),  $\Lambda_{3\ell}$  ( $\ell \neq 3$ ), ...,  $\Lambda_{M\ell}$  ( $\ell \neq M$ ). Таким чином, максимально можливе число перевірок буде дорівнювати  $M(M-1)$ .

**Синтез багатоканальної системи радіолокаційного розпізнавання.** Радіолокаційне розпізнавання завжди ускладнюється наявністю шумів та відбиттів. Будемо характеризувати багатомірну густину ймовірності комплексних амплітуд  $\eta_i$  у відсутності будь-яких цілей розподілом  $p_0(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)$ .

Запишемо (3) наступним чином: якщо  $p_k(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N) > p_l(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N), \forall l \neq k$ , то  $A_k^*$ . Розділимо ліву та праву частини нерівності на  $p_0(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)$ . Рішення буде мати вигляд:

якщо

$$\frac{p_k(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)}{p_0(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)} > \frac{p_l(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)}{p_0(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_N)}, \forall l \neq k,$$

то

$$A_k^* \tag{4}$$

Ліва та права частини нерівності (4) свідчать про те, що спочатку необхідно здійснити оптимальну обробку кожного елемента  $\eta_i$  РЛП за усіма  $N$  елементами розділення за правилом:

$$\Lambda_{kl} = \frac{p_k(\eta_i)}{p_l(\eta_i)}.$$

Практично це означає необхідність здійснення в  $N$  каналах оптимальної фільтрової або кореляційної, внутрішньоперіодної, міжперіодної і міжканальної, часової і просторової обробки сигналу на фоні шумів, відбиттів і випромінювань (рис. 1).

В результаті оптимальної обробки на виході  $N$  каналів утворюється сукупність коливань з комплексними амплітудами  $\xi_i$ , яка зберігає усі властивості комплексних амплітуд  $\eta_i$ , тобто РЛП.

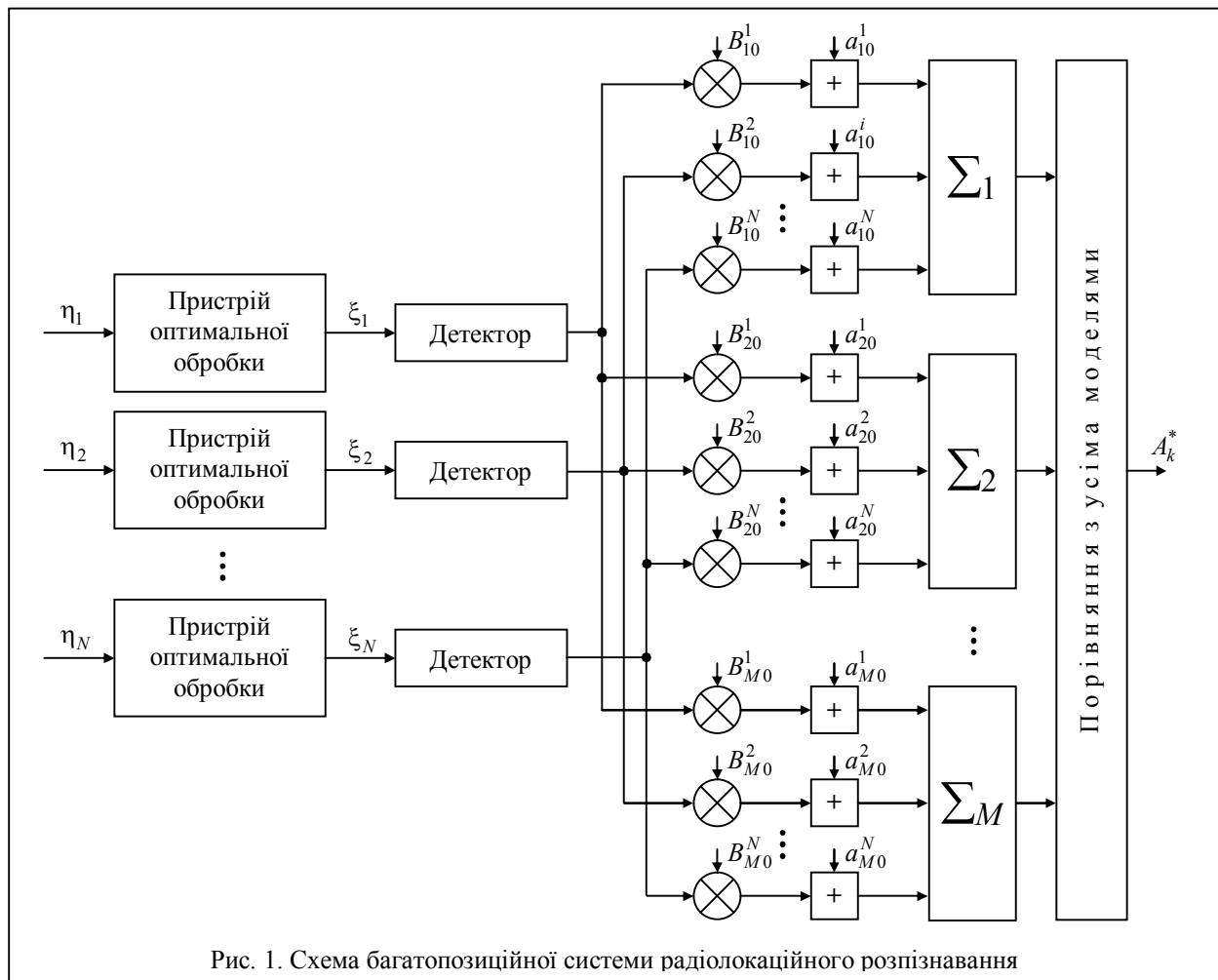


Рис. 1. Схема багатопозиційної системи радіолокаційного розпізнавання

З урахуванням статистичної незалежності та нормального закону розподілу комплексних амплітуд їх багатомірна густина ймовірності

$$p_k(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{4\pi(\sigma_{ik}^2 + \sigma_{i0}^2)} \times \exp\left(-\frac{|\xi_i|^2}{2(\sigma_{ik}^2 + \sigma_{i0}^2)}\right) \tag{5}$$

У (5) та (6):  $\sigma_{ik}^2$  – дисперсії комплексних амплітуд  $\xi_i$  РЛП цілей  $k$ -го класу, які повинні бути априорно відомими;  $\sigma_{i0}^2$  – дисперсії комплексних амплітуд  $\xi_i$  шуму, які є однаковими для усіх елементів розділення. Рішення можна приймати зважаючи на величину  $Z_{k0}$ , яка однозначно зв'язана з відношенням правдоподібності:

$$Z_{k_0} = \ln \Lambda_{k_0} = \sum_{i=1}^N (b_{k_0}^i |\xi_i|^2 + a_{k_0}^i), \quad (7)$$

$$\text{де } a_{k_0}^i = \ln \frac{\sigma_{i0}^2}{\sigma_{ik}^2 + \sigma_{i0}^2}; \quad b_{k_0}^i = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{i0}^2} - \frac{1}{\sigma_{k_0}^2 + \sigma_{i0}^2} \right).$$

Розв'язувальне правило (4) з урахуванням введеного алгоритму відношення правдоподібності (7) виглядає наступним чином:

$$\text{якщо } Z_{k_0} > Z_{\ell_0}, \quad \forall \ell \neq k, \quad \text{то } A_k^*. \quad (8)$$

Відповідно до апріорно відомої статистики, тобто з відомим розподілом потужності відбитого сигналу за елементами розділення РЛП цілей усіх  $M$  класів, здійснюється некогерентне зважене підсумовування комплексних амплітуд  $\xi_i$  відповідно до (7) по  $M$  каналам для кожного  $k$ -го класу цілей.

В результаті порівняння випадкових величин  $Z_{k_0}$  в усіх каналах приймається рішення про наявність цілі того класу, для якого випадкова величина є максимальною, тобто відстань до реалізації, що спостерігається, буде меншою, ніж до будь-якого іншого класу.

Таким чином, процес упізнання класу цілей полягає в тому, що у пристрої розпізнавання відтворюються моделі класів цілей, які розпізнаються, і результати вимірювань параметрів реальних цілей порівнюються з усіма моделями. За істинну приймається та гіпотеза, стосовно якої ціль є присутньою, та її параметри найбільш схожі на параметри еталону, що запам'ятовуються у пристрої розпізнавання.

## Висновки

Підвищення роздільності за дальністю, швидкістю та кутовими координатами необхідне для підвищення точності визначення координат і параметрів цілей, для рішення задач розпізнавання з використанням РЛП, а також для покращення якості се-

лекції цілей на фоні завад. Отримання РЛП можливе лише за умов розрізнення елементів образу цілі, а його використання забезпечує збільшення інформативності самого процесу розпізнавання.

Синтезована багатоканальна система радіолокаційного розпізнавання, яка приймає рішення шляхом порівняння параметрів реальних цілей з апріорно заданими моделями, дозволяє здійснювати в  $N$  каналах оптимальну фільтрову або кореляційну, внутрішньоперіодну, міжперіодну і міжканальну, часову і просторову обробку сигналів на фоні шумів, відбиттів і випромінювань.

## Список літератури

1. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.: ил.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация / С.З. Кузьмин. – К.: Изд. КВИЦ, 2000. – 428 с.
4. Седишев Ю.М. Про можливість визначення висоти повітряних цілей в мультирадарній системі двокоординатних оглядових РЛС / Ю.М. Седишев, В.О. Тютюнник, А.Ф. Шевченко // Системи озброєння і військова техніка. – 2010. – Вип. 2(22). – С. 159-164.
5. Седишев С.Ю. Об оптимизации обработки сигнала по критерию минимума среднего риска. Харьков, АН-ПРЭ // Прикладная радиоэлектроника. – 2005. – Т. 4, №4. – С. 394-399.
6. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Торочин та ін. – К.: МО України, Х.: ХВУ, 2003. – 368 с.

Надійшла до редколегії 20.04.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## СИНТЕЗ МНОГОКАНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ РАДИОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПОЗНАВАННЯ

О.В. Карпенко, В.В. Онищенко

В статье рассматриваются вопросы радиолокационного обнаружения и распознавания целей по радиолокационному портрету, представляющему собой распределение комплексных амплитуд отраженного сигнала по элементам разрешения цели. Предложена многоканальная система радиолокационного распознавания, принимающая решение путем сравнения параметров реальных целей с априорно заданными моделями.

**Ключевые слова:** радиолокационный портрет, образ цели, разрешающая способность, классы распознавания, поляризация матрица рассеяния, радиус частотной корреляции, комплексная амплитуда, критерий минимума среднего риска, отношение правдоподобности.

## SYNTHESIS OF MULTICHANNEL RADAR RECOGNITION SYSTEM

O.V. Karpenko, V.V. Onischenko

The questions of radar target detection and recognition by the radar portrait, that represents distributing of complex amplitudes of the reflected signal by the target resolution elements, are examined in the article. The multichannel radar recognition system, that resolves by comparison of the real targets parameters with the models set a priori, is offered.

**Keywords:** radar portrait, target image, resolving power, classes of recognition, polarization scattering matrix, frequency correlation radius, complex amplitude, average risk criterion, likelihood ratio.