С.П. Лещенко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АЛГОРИТМ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ПО ЇХ ДАЛЬНІСНИМ ПОРТРЕТАМ З ВІДМОВАМИ

Наводяться результати дослідження радіолокаційного розпізнавання повітряних об'єктів по їх дальнісним портретам з використанням кореляційного алгоритму. В якості основної ознаки розпізнавання розглядається радіолокаційний дальнісний портрет, що отримується при використанні зондуючих сигналів з високою розрізняювальною спроможністю по дальності. В якості додаткових ознак розглядаються траєкторна ознака та ознака роторної модуляції. Особливістю роботи кореляційного алгоритму є можливість формування рішення “відмова”, крім рішень на користь одного з типів цілей, по яким було виконано навчання системи. Така особливість зменшує вірогідність видачі помилкових рішень при зменшенні відношення сигнал – шум, або при спостереженні цілі невідомого типу. Дослідження виконані методом математичного моделювання. Дослідження розпізнавання виконувалися для 20 типів повітряних об'єктів, що включали турбореактивні літаки, гвинтові літаки, вертольоти та ракети. Отримані чисельні значення показників якості розпізнавання типу повітряного об'єкту.

Ключові слова: радіолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів, якість розпізнавання, радіолокаційний дальнісний портрет, кореляційний алгоритм, математичне моделювання.

Вступ

Постановка проблеми. Проблеми радіолокаційного розпізнавання повітряних об'єктів (ПО) досліджуються з 60-х років минулого століття [1–3]. Особливо актуальним вирішення цього питання стало після трагічних випадків ненавмисного застосування засобів ППО проти цивільних повітряних суден (ПС). Останній такий випадок трапився 8 січня 2020 року, коли іранський ЗРК влучив у Boeing 737, що належав авіакомпанії “Міжнародні авіалінії України”.

Радіолокаційне розпізнавання може бути кооперативним та некооперативним. При кооперативному розпізнаванні процедура зводиться до обміну кодованими повідомленнями в радіолініях “радіолокаційна станція (РЛС) – ПС” та “ПС – РЛС”. При некооперативному розпізнаванні інформація про ПС витягується з відбитих корпусом ПО радіолокаційних сигналів. Нас цікавить останній вид розпізнавання. Для вирішення задачі некооперативного радіолокаційного розпізнавання досліджувалося використання різноманітних ознак: траєкторних, амплітудних, поляризаційних, спектрів роторної (або вторинної або пропелерної або турбінної) модуляції, радіолокаційні дальнісні портрети (РЛДП). Як показали виконані дослідження [4–7], для вирішення задачі радіолокаційного розпізнавання найбільш підходить в якості ознаки РЛДП. Радіолокаційний дальнісний портрет (в англomовній літературі HRRP – “high-resolution range profile”) отримується при використанні широкосмугових радіолокаційних сигналів, що забезпечують розрізнення окремих

елементів планеру ПО за дальністю. Якість розпізнавання може бути підвищення при застосуванні крім ознаки РЛДП додаткових ознак, таких як траєкторні ознаки та ознака роторної модуляції луна – сигналів (в англomовній літературі JEM – jet engine modulation). Роторна модуляція породжується відбиттям від швидкообертаючих елементів ПО – лопатей повітряних гвинтів та лопаток компресорів (турбін) турбореактивних двигунів. Як показали дослідження [8], використання траєкторних ознак в якості додаткових дає більший приріст якості розпізнавання ніж ознака роторної модуляції.

У всіх відомих роботах по розпізнаванню ПО розглядається варіант, коли кількість рішень, що може приймати система розпізнавання, співпадає з кількістю типів (класів) ПО, що були використані на етапі навчання системи. Практика показує, що в системі розпізнавання доцільно передбачити видачу рішення “відмова”. Рішення “відмова” повинно видаватися у випадку сумніву, що ПО, який спостерігається, належить до одного з типів (класів) цілей, на які було здійснене навчання системи. Така ситуація може спостерігатися при малому відношенні сигнал – шум, коли зменшується вірогідність правильного розпізнавання, або при спостереженні ПО нового типу, для якого в системі відсутні еталонні ознаки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На теперішній час опубліковано ряд фундаментальних узагальнюючих робіт по вирішенню задачі радіолокаційного розпізнавання ПО [4–7], в яких описуються всі відомі ознаки розпізнавання. Розпізнаванню ПО з використанням ознаки РЛДП присвячені робо-

ти [8–18]. Для прийняття рішень автори розглядають різні алгоритми. Найбільш часто пропонується використання кореляційних алгоритмів [8–10; 13; 18] або алгоритмів на основі нейромереж [11–12].

Мета статті – розробка алгоритму розпізнавання ПО, що крім видачі рішень на користь одного з типів (класів) ПО, на які здійснювалося навчання системи, видає рішення “відмова”, та оцінка показників якості його роботи.

Виклад основного матеріалу

Кореляційний алгоритм розпізнавання з відмовами. У [4] показано, що оптимальне розпізнавання за правилом Байєса по РЛДП, що не флюктують, зводиться до обчислення логарифму відношення правдоподібності

$$\ln l_i(y) = \frac{1}{\sigma^2} y^T x_i - \frac{1}{2\sigma^2} x_i^T x_i = \frac{1}{\sigma^2} \left(Z_i - \frac{q_i^2}{2} \right),$$

де $Z_i = y^T x_i = \sum_{n=1}^N y_n x_{in}$ – кореляційна сума РЛДП y , що прийнятий, з еталонним РЛДП цілі i -го типу x_i , σ^2 – дисперсія відліків шуму, що розподілені за нормальним законом, q_i^2 – параметр, що характеризує енергію РЛДП. Так як логарифм відношення правдоподібності монотонно залежить від кореляційної суми, то алгоритм розпізнавання може бути записаним у вигляді

$$\hat{k} = \max_i Z_i.$$

Наведений вираз каже про те, що рішення приймається на користь того типу (класу), з еталонном якого досягається максимальне значення кореляційної суми.

У випадку, коли РЛДП “дружно” флюктують за амплітудою (но не за формою), математична модель РЛДП може бути записана у вигляді

$$y = Bx_{in} + n,$$

де B – випадковий амплітудний множник, x_{in} – нормований еталонний РЛДП цілі i -го типу (класу), n – вектор нормально розподілених відліків шуму. Нормування РЛДП виконується таким чином, щоб виконувалася рівність

$$\sum_{n=1}^N x_{inn}^2 = 1.$$

Якщо випадковий амплітудний множник розподілений по закону Релея

$$P(B) = \frac{B}{\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{B^2}{2\sigma_1^2}\right),$$

то логарифм відношення правдоподібності приймає вигляд [4]:

$$l_i(y) = \frac{C\sqrt{\pi}\sigma^2 Z_{in} + \sqrt{2}\sigma\sigma_1\sqrt{\sigma^2 + \sigma_1^2}}{\sigma^2 + \sigma_1^2 + \sqrt{2(\sigma^2 + \sigma_1^2)}\sigma\sigma_1} e^{\frac{Z_{in}^2\sigma^2}{\sigma_1^2(\sigma^2 + \sigma_1^2)}},$$

де $C = \text{erf}(\infty) \approx 0,785$.

Аналіз виразу показує, що відношення правдоподібності монотонно залежить від нормованої кореляційної функції Z_{in} . Тому алгоритм розпізнавання може бути записано

$$\hat{k} = \max_i Z_{in},$$

$$Z_{in} = y^T x_{in}. \quad (1)$$

Як і в попередньому випадку, при розпізнаванні РЛДП, що “дружно” флюктують, рішення приймається на користь того типу (класу), з еталонном якого досягається максимальне значення кореляційної суми. Відміною є те, що в останньому випадку еталонні РЛДП повинні бути нормованими.

Кореляційний алгоритм є оптимальним при розпізнаванні РЛДП, що не флюктують по формі (но не по амплітуді). Форма РЛДП реальних повітряних цілей флюктує. Для розпізнавання РЛДП, що флюктують по формі, необхідно використовувати не один еталонний РЛДП, а набір РЛДП. Це дозволяє врахувати до деякого ступеню мінливість форми реальних РЛДП. Основний вплив на мінливість форми РЛДП надає зміна ракурсу спостереження ПО, тому, як показано у [10], розпізнавання необхідно виконувати у виділених ракурсних секторах, причому в кожному ракурсному секторі необхідно на кожний тип (клас) формувати набір еталонних РЛДП.

Так як при прийомі РЛДП його точне положення по дальності у вікні спостереження невідоме, при розрахунку кореляційної суми з еталонними РЛДП необхідно перевірити всі гіпотези про взаємне положення прийнятого РЛДП та еталонного. В якості значення кореляційної суми обирається його максимальне значення

$$Z_{in} = \max_l \sum_{n=1}^N y_n x_{i(n+l)},$$

де N – кількість відліків, якими представлені прийнятий РЛДП, та еталонні РЛДП;

l – поточний зсув взаємного положення прийнятого РЛДП та еталонного, $-N/2 \leq l \leq N/2$.

Кореляційний алгоритм в описаному вигляді має суттєвий недолік, який полягає в тому, що рішення на користь одного з типів цілей, на розпізнавання яких було навчено систему, буде прийнято завжди, незалежно від деяких умов, а саме – відношення сигнал – шум, та спроби розпізнавання типу цілі, для якої не має еталонних даних. Так як на практиці вказані умови присутні завжди, в алгоритмі розпізнавання необхідно передбачити можливість видачі рішення “ВІДМОВА”.

Для кореляційного алгоритму рішення “ВІДМОВА” повинно прийматися у випадку, коли розрахована максимальна кореляційна сума буде менша за визначений поріг. Значення кореляційних сум, що розраховуються згідно (1), залежать від ступеня схожості прийнятого та еталонного РЛДП, а також

від енергії прийнятого РЛДП. Так як енергія прийнятого РЛДП може змінюватися в широких межах, то і значення кореляційної суми може змінюватися в широких межах. Це ускладнює правило вибору порогу прийняття рішення “ВІДМОВА”. Для виключення впливу енергії прийнятого РЛДП на значення кореляційної суми, алгоритм (1) необхідно модифікувати наступним чином

$$Z_{in} = y_n^T x_{in}. \quad (2)$$

Відмінність виразу (2) від (1) полягає в тому, що розрахунок кореляційної суми здійснюється по нормованому прийнятому РЛДП. Для нормованого прийнятого РЛДП повинна виконуватися умова

$$\sum_{n=1}^N y_{nn}^2 = 1.$$

Розрахунок кореляційної суми згідно (2) фактично співпадає з розрахунком коефіцієнту взаємної кореляції між прийнятим та еталонними РЛДП. Максимальне значення коефіцієнту кореляції дорівнює “1”, що спрощує вибір порогу прийняття рішення “ВІДМОВА”. Для кореляційного алгоритму розпізнавання рішення “ВІДМОВА” приймається у випадку, коли максимальне значення коефіцієнту кореляції прийнятого РЛДП з еталонними буде менше визначеного порогу Z_p . Поріг повинен обиратися таким чином, щоб при розпізнаванні цілей відомих цілей з достатнім рівнем співвідношення сигнал-шум вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” була у розумних межах – не вище 0,1–0,3.

Визначення порогових значень коефіцієнту кореляції необхідно виконувати на етапі навчання системи розпізнавання. На етапі навчання по навчальній вибірці РЛДП спочатку розраховуються еталонні РЛДП. На кожний тип цілей та кожний ракурсний сектор розраховується набір з M еталонних РЛДП. Розраховуються коефіцієнти кореляції кожного РЛДП з навчальної вибірки з еталонними РЛДП. В якості коефіцієнту кореляції обирається максимальне значення з набору з M еталонних РЛДП:

$$Z = \max_m Z_m, m \in 1, M.$$

Будується варіаційний ряд у порядку зменшення значення коефіцієнту кореляції. Кількість елементів ряду L дорівнює кількості РЛДП у навчальній вибірці. Приклад варіаційного ряду наведено на рис. 1.

Рис. 1. Приклад варіаційного ряду коефіцієнту кореляції

Обирається поріг Z_p , що забезпечує задану вірогідність видачі рішення “ВІДМОВА” P_v на навчальній вибірці. Поріг дорівнює значенню коефіцієнту кореляції для елементу ряду з порядковим номером $L(1-P_v)$. Для прикладу, на рис. 1 наведено вибір порогу $Z_p=0.907$, що забезпечує $P_v=0.15$. Вказане значення порогу відповідає квантилю ряду 0,85. Безумовно, що при роботі системи розпізнавання вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” може бути дещо іншою, але на етапі навчання ми маємо тільки навчальну вибірку.

Остаточний вибір параметрів алгоритму може бути здійснений на реальних даних, або даних, що отримуються шляхом моделювання. В нашому випадку дослідження запропонованого алгоритму виконано шляхом математичного моделювання.

Стислий огляд математичної моделі розрахунку відбитих радіолокаційних сигналів. Для розрахунку РЛДП використовувалася математична модель “BSS” [19; 5], що забезпечує виконання розрахунків відбитих радіолокаційних луна-сигналів від ПО визначених типів з урахування ракурсів їх спостереження. В моделі складна форма ПО апроксимується сукупністю поверхонь, аналітичний опис яких не перевищує другого порядку і для яких відомі приблизні вирішення задачі розрахунку відбитого радіолокаційного сигналу. Відбитий радіолокаційний сигнал розраховується у вигляді суперпозиції відбитків від кожної апроксимуючої поверхні окремо. Також враховуються бортові антени та швидкообертаючі елементи конструкції ПО. До таких елементів належать лопатки компресорів і турбін турбореактивних літаків та лопаті повітряних гвинтів. Швидкообертаючі елементи створюють специфічну модуляцію луна-сигналів, що називають роторною, або турбінною, або пропелерною.

Всього були розроблені математичні моделі повітряних об'єктів 20 типів: важкі реактивні бомбардувальники (B-52, B-1B, Ту-16), літаки тактичної авіації (F-15, F-16, Tornado, Су-24, Су-27, МиГ-29, МиГ-21), транспортний гвинтовий літак (Ан-26), комерційні літаки (Boeing 737, Boeing 737-800, Airbus A320-200), ударний вертоліт (Ан-64), легкомоторні гвинтові літаки (KT-1, Cessna 172), крилаті ракети (ALCM, GLCM), ракета-пастка. Ракета-пастка не має реального прототипу. Вона представляє собою модель крилатої ракети ALCM, в носову та хвостову частини якої встановлені відбивачі радіолокаційних сигналів типу лінзи Люнібергу для штучного збільшення ефективної поверхні розсіювання.

Моделювалася робота РЛС з наступними параметрами: довжина хвилі – 0,1 метру, частота повторення – 1000 Гц, тип сигналу – лінійно-частотно модульований з прямокутною огинаючою та шириною спектру 200 МГц. Такий сигнал забезпечує роз-

різнювальну спроможність по дальності 0,75 метру, що значно менше геометричних розмірів всіх ПО. Для зменшення рівня бічних пелюсток стислого сигналу виконується вагова обробка з застосуванням фільтру Хеммінгу. Довжина строби спостереження складала 120 метрів. Для отримання одного накопленого РЛДП моделювалося випромінювання пачки з 50 ширококутових сигналів. При моделюванні ПО здійснювали політ з крейсерськими швидкостями, що потребувало необхідності здійснення процедури вирівнювання РЛДП однієї пачки по дальності, як показано в [18]. Враховувалося, що швидкість цілі вимірювалася з середньоквадратичними помилками 20 км/г, а курсу (ракурсу спостереження ПО) 2°.

Показники якості радіолокаційного розпізнавання. До початку моделювання радіолокаційного розпізнавання необхідно визначитися з показниками якості розпізнавання, що підлягають оцінюванню. Найбільш повно якість системи розпізнавання характеризує матриця розпізнавання [7]. Елементами матриці є умовні вірогідності прийняття рішення о приналежності об'єкту i -го типу до типу k $P(k|i)$. Матриця є квадратною розмірністю $K \times K$, де K – кількість типів ПО, що розпізнаються. Кожен рядок матриці характеризує якість розпізнавання конкретного об'єкту. Столпчики матриці відповідають прийнятим рішенням. На головній діагоналі матриці знаходяться значення умовних вірогідностей прийняття правильних рішень. Всі інші елементи матриці є значеннями умовних вірогідностей прийняття помилкових рішень. Елементи одного рядку матриці утворюють повну групу подій і відповідно їх сума дорівнює одиниці. Матриця розпізнавання найбільш повно характеризує якість системи, але її використання не є зручним. Наприклад, у нашому випадку розпізнавання 20 типів ПО матриця має розмірність 20×20 та складається з 400 чисел. Журнальний формат не дозволяє привести навіть одну таку матрицю. Іншим, та найбільш поширеним показником якості системи розпізнавання є безумовна вірогідність правильного розпізнавання (або просто вірогідність розпізнавання) P_{np} . Вона розраховується як середнє арифметичне діагональних елементів матриці розпізнавання

$$P_{np} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K P(i|i).$$

На практиці приведені співвідношення справедливі за умови, що оцінки вірогідностей розпізнавання отримані по вибіркам однакової розмірності. В умовах, коли розмір вибірки може суттєво відрізнятися, що особливо притаманно при використанні алгоритму розпізнавання з відмовами, розрахунок вірогідності розпізнавання виконується згідно виразу

$$P_{np} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \frac{P(i|i)L_i}{L_{\Sigma}},$$

$$L_{\Sigma} = \sum_{i=1}^K L_i,$$

де L_i – розбір вибірки, що використовувався для оцінки вірогідності розпізнавання цілі i -го типу.

Перевагою показника P_{np} є його простий і зрозумілий фізичний сенс. Недоліком показника є те, що він не враховує розподіл умовних вірогідностей прийняття помилкових рішень та кількість типів об'єктів, що розпізнаються. Наприклад, використання цього показника не може дати відповідь на питання – яка система краща, та що розпізнає два типи об'єктів з вірогідністю 0,95, або система, що розпізнає десять типів об'єктів з вірогідністю 0,8. Формально краще перша, хоча інтуїтивно зрозуміло, що краще друга. Для відповіді на поставлене питання необхідно порівнювати P_{np} з вірогідністю вгадування P_e . При рівновірогідній появі об'єктів розпізнавання вірогідність вгадування $P_e = 1/K$. Тому при розпізнаванні тільки двох об'єктів $P_e = 1/2 = 0.5$. При $P_{np} = 0.95$, вірогідність збільшується в 1.9 рази. При розпізнаванні десяти об'єктів $P_e = 1/10 = 0.1$. При $P_{np} = 0.8$, вірогідність збільшується в 8 разів. Тобто друга система значно краще за першу. В нашому випадку розпізнавання 20 типів ПО $P_e = 1/20 = 0.05$. В цьому випадку навіть $P_{np} = 0.5$ слід вважати хорошим показником.

Вільним від недоліків, що притаманні вірогідності розпізнавання, є кількість інформації розпізнавання I , що розраховується за виразом [20]:

$$I = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^K P(k)P(i|k) \log_2 \frac{P(i|k)}{\sum_{j=1}^K P(j)P(i|j)},$$

де $P(k)$ – апіорна вірогідність появи об'єкту k -го типу. Якщо апіорна вірогідність для всіх об'єктів однакова, то $P(k) = P(i) = P(j) = 1/K$.

Хоча показник I не є цілим числом, фізично він показує необхідну кількість двійкових розрядів, потрібних для представлення всієї інформації розпізнавання. Значення показника залежить від вірогідності правильного розпізнавання, розподілу умовних вірогідностей прийняття помилкових рішень і числа об'єктів, що розпізнаються. Значення показника тим більше, чим більше вірогідність правильного розпізнавання та число об'єктів, що розпізнаються. При однаковій значенні вірогідності правильного розпізнавання та кількості об'єктів, що розпізнаються, найменша кількість інформації буде при рівномірному розподілі вірогідності прийняття помилкових рішень. Мінімальне можливе значення показника дорівнює нулю. Приведений показник кількості інформації є загальноприйнятим в теорії інформації [21], але логарифмічна шкала показника не дозволяє порівнювати значення у відсотках. Для цього потрібна лінійна шкала показника. Кількість

інформації у лінійній шкалі розраховується за виразом

$$J = 2^I.$$

Фізично показник J показує еквівалентну кількість типів (класів), що розпізнаються достовірно. В нашому випадку при розпізнаванні 20 типів ПО максимально можливе значення $J=20$. Це значення буде досягнуто при достовірному розпізнаванні усіх типів ПО. Якщо вірогідність розпізнавання хоча б одного типу ПО буде менше за одиницю, значення показника буде менше за 20. Мініміально можливе значення $J=2^0=1$.

Результати досліджень кореляційного алгоритму розпізнавання ПО з відмовами. Враховуючи те, що всі ПО мають осьову симетрію, дослідження по визначенню залежності якості радіолокаційного розпізнавання можна проводити тільки в секторі кутів $0^\circ - 180^\circ$, а не $0^\circ - 360^\circ$. За допомогою математичної моделі “BSS” були отримані по 7600 реалізації пачок радіолокаційних РЛДП кожного типу ПО для навчальної і контрольної вибірок окремо. Усього розраховано 304000 пачок. Кожна пачка вміщувала 50 окремих РЛДП. Значення кутів крену та тангажу ПО при отриманні кожної пачки РЛДП визначалося випадковими, нормально розподіленими числами з нульовим середнім і середньоквадратичним відхиленням $2,5^\circ$ для куту крену та 2° для куту тангажу.

З отриманою вибіркою РЛДП виконана обробка, що виконується в приймальному пристрої РЛС, а саме: додані відліки шуму у заданому співвідношенні. Зроблено детектування та некогерентне накопичування у межах однієї пачки РЛДП з урахуванням зміщення РЛДП, обумовленого наявністю радіальної швидкості ПО. Шум приймального пристрою моделювався додаванням до квадратурних складових випадкових чисел, розподілених по нормальному закону з нульовим середнім, та середньоквадратичним відхиленням, що забезпечувало задане відношення сигнал-шум. Для навчальної вибірки значення сигнал-шум обиралися випадково з рівномірними розподілом в діапазоні 3–27 дБ на один РЛДП пачки. З урахуванням того, що при накопиченні 50 РЛДП пачки відношення сигнал-шум збільшується на приблизно на 17 дБ, відношення сигнал шум накоплених РЛДП знаходилося в діапазоні 20–35 дБ. Для контрольної вибірки значення сигнал-шум обиралися як випадково з рівномірними розподілом в діапазоні 3–27 дБ на один РЛДП пачки, так і для фіксованого значення відношення сигнал-шум.

Навчання системи розпізнавання при використанні кореляційного алгоритму зводиться до розрахунку набору еталонних РЛДП. Набори еталонних портретів розраховувалися для окремих ракурсних секторів розміром по 10° , що забезпечують найбільшу якість розпізнавання [10]. З урахуванням ві-

сьової симетрії ПО усього використовувалося 19 ракурсних секторів. В кожному ракурсному секторі, для кожного типу ПО розраховувалося по 12 еталонних РЛДП, тобто всього було розраховано $19 \times 20 \times 12 = 4560$ еталонних РЛДП. Для кожного ракурсного сектору та кожного типу ПО було визначено порогові значення коефіцієнту кореляції для квантилів 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 0.99, що відповідають вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” по навчальній вибірці 0.35, 0.3, 0.25, 0.2, 0.15, 0.1, 0.05, 0.01 відповідно. Залежності розрахованих порогових значень коефіцієнту кореляції від ракурсу спостереження для цілей типу В-52 та ракети-пастки для квантилю 0.85 наведено на рис. 2.

Рис. 2. Залежність порогового коефіцієнту кореляції від ракурсу для квантилю 0.85 для бомбардувальника В-52 (суцільна лінія) та ракети – пастки (пунктирна лінія)

Результати розрахунків вказують на те, що порогові значення коефіцієнту кореляції суттєво залежать від ракурсу спостереження та типу цілі, що підтверджує необхідність їх розрахунку окремо для кожного ракурсного сектору та типу цілі. Порогові значення для ракети-пастки значно вище порогових значень для літака В-52. Це пояснюється тим, що форма РЛДП ракети-пастки, як правило, складається з одного піку і при зміні ракурсу спостереження змінюється несуттєво, що забезпечує високі значення коефіцієнту кореляції. Форма РЛДП літака В-52 складається з багатьох піків і при зміні ракурсу спостереження змінюється суттєво, що приводить до зниження коефіцієнтів кореляції.

Результати моделювання роботи кореляційного алгоритму розпізнавання ПО по їх РЛДП та залученням додаткових ознак [8] у вигляді графіків залежності вірогідності правильного розпізнавання та вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” від відношення сигнал-шум наведено на рис. 3–4. Значення вірогідностей є результатом осереднення за ракурсами спостереження та типами ПО. Відношення сигнал-шум відповідає відношенню для окремого РЛДП пачки. Графіки на рис. 3 відповідають визначенню порогового коефіцієнту для квантилю 0.7 (вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” по навчальній вибірці 0.3). Графіки на рис. 4 відпові-

дають визначенню порогового коефіцієнту для квантилю 0.9 (вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” по навчальній вибірці 0.1).

Рис. 3. Залежність вірогідності розпізнавання (суцільна лінія) та вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” (пунктирна лінія) від відношення сигнал-шум (дБ) для порогового значення коефіцієнта кореляції для квантилю 0.7

Рис. 4. Залежність вірогідності розпізнавання (суцільна лінія) та вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” (пунктирна лінія) від відношення сигнал-шум (дБ) для порогового значення коефіцієнта кореляції для квантилю 0.9

Результати моделювання показують, що при використанні алгоритму з відмовами вірогідність розпізнавання при зменшенні відношення сигнал-шум не зменшується, як зазвичай, а навіть дещо збільшується. Цей факт не повинен бентежити, тому що збільшення вірогідності розпізнавання супроводжується різким збільшенням вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА”. Для порівняння на рис. 5 наведена залежність вірогідності правильного розпізнавання при використанні кореляційного алгоритму, що не формує рішень “ВІДМОВА”.

Рис. 5. Залежність вірогідності розпізнавання від відношення сигнал-шум (дБ) для алгоритму, що не формує рішень “ВІДМОВА”

Якщо вважати, що система розпізнавання вважається працездатною, коли вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” менше за 0.5, то, згідно отриманих результатів, при пороговому значенні коефіцієнту кореляції для квантилю 0.7, працездатність системи втрачається при зниженні відношення сигнал-шум менше за 9 дБ, а для квантилю 0.9 менше за 5 дБ. Але, згідно з графіком на рис. 5, навіть при відношенні сигнал-шум 5 дБ, та використанні алгоритму без формування рішення “ВІДМОВА” вірогідність правильного розпізнавання залишається досить високою – 0.87. Для збереження працездатності системи розпізнавання з відмовами при менших значеннях сигнал-шум потрібно зменшувати порогове значення коефіцієнту кореляції використовуючи більші значення квантилю. Але в цьому випадку, при збільшенні відношення сигнал-шум буде суттєво зменшуватися вірогідність формування рішення “ВІДМОВА”. Враховуючи наведені факти можна прийти до висновку, що порогове значення коефіцієнту кореляції потрібно визначати адаптивно до відношення сигнал-шум. В табл. 1 наведені експериментально підібрані значення відношення сигнал-шум накопленого РЛДП та квантилі для визначення порогових значень коефіцієнту кореляції.

Таблиця 1

Значення відношення сигнал-шум накопленого РЛДП та квантилі для визначення порогових значень коефіцієнту кореляції

Відношення сигнал-шум (дБ)	Квантиль
< 20.6	0.99
20.6 – 23.2	0.99 – 0.95
23.2 – 26.2	0.95 – 0.85
26.2 – 29.2	0.85 – 0.8
29.2 – 34.7	0.8 – 0.75
34.7 – 42	0.75 – 0.7
42 – 49	0.7 – 0.65
>49	0.65

Відношення сигнал-шум в табл. 1 відповідає відношенню в накопленому РЛДП, після накопичення 50 РЛДП пачки. При роботі алгоритму розпізнавання, порогове значення коефіцієнту кореляції визначалося шляхом лінійної інтерполяції між значеннями граничних порогів, визначених відповідними квантилями.

Результати моделювання роботи адаптивного кореляційного алгоритму розпізнавання з відмовами наведено на рис. 6.

Рис. 6. Залежність вірогідності розпізнавання адаптивного алгоритму (суцільна лінія), вірогідності розпізнавання для алгоритму без відмов (пунктирна лінія) та вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” (точкова лінія) від відношення сигнал – шум (дБ)

Отримані результати показують, що адаптивний алгоритм розпізнавання з відмовами забезпечує деяке збільшення вірогідності правильного розпізнавання при великих відношеннях сигнал-шум. При зменшенні відношення сигнал-шум вірогідність розпізнавання не зменшується завдяки збільшенню вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА”. При великих значеннях сигнал-шум вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” відносно стабільна на рівні 0.1.

На рис. 7–8 наведено залежності вірогідності правильного розпізнавання та кількості інформації розпізнавання в залежності від ракурсу спостереження ПО відповідно, при усередненні даних по типам ПО та відношенню сигнал-шум в діапазоні від 3 до 27 дБ.

При моделюванні прийнято, що ракурс 0° відповідає спостереженню ПО з хвоста, ракурс 90° – спостереженню з борта та ракурс 180° – спостереженню з носу. Найгірша якість розпізнавання забезпечується при спостереженні ПО з бортового ракурсу, що збігається з даними [10].

В цілому адаптивний алгоритм розпізнавання забезпечує незначне підвищення вірогідності правильного розпізнавання з 0.83 до 0.85 (1.7%) та кількості інформації розпізнавання з 9.43 до 9.95 (5.5%).

Головний інтерес викликає дослідження функціонування алгоритму розпізнавання з відмовами при спостереженні ПО невідомих типів, для яких не здійснювалося навчання системи розпізнавання. Для моделювання цієї ситуації, при виконанні розпізнавання заборонялося здійснювати порівняння прийнятих реалізацій з еталонними даними “свого” типу. Це еквівалентно тому, що система розпізнавання була навчена на розпізнавання 19 типів цілей, за винятком того типу, що пред’явлено до розпізнавання. Природно, що для цих умов вірогідність прийняття правильних рішень дорівнює нулю і показником якості є тільки вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА”. Опосередковано ця вірогідність є вірогідністю виявлення цілі невідомого типу.

Рис. 7. Залежність вірогідності розпізнавання при використанні адаптивного алгоритму (суцільна лінія) та алгоритму без відмов (пунктирна лінія) від ракурсу спостереження

Рис. 8. Залежність кількості інформації розпізнавання при використанні адаптивного алгоритму (суцільна лінія) та алгоритму без відмов (пунктирна лінія) від ракурсу спостереження

На рис. 9 наведено залежність вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” від ракурсу спостереження ПО. Наведені дані є результатом усереднення за відношенням сигнал-шум в діапазоні 3–27 дБ та по 20 типам цілей. На рис. 9 суцільна лінія показує вірогідність прийняття рішення “ВІДМОВА” в умовах спостереження цілі невідомого типу. Штрихова лінія показує залежність прийняття рішення “ВІДМОВА” в умовах спостереження цілей тільки відомих типів.

Рис. 9. Залежність вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” в умовах спостереження ПО невідомого типу (суцільна лінія) та ПО відомого типу (штрихова лінія) від ракурсу спостереження

Отримані дані свідчать про те, що вірогідність видачі рішення “ВІДМОВА” при спостереженні цілі невідомого типу різко зростає. При усередненні даних по ракурсу спостереження вірогідність зростає з

0.14 до 0.57, тобто більш ніж у 4 рази. Якщо розглядати найбільш цікавий ракурс спостереження – носовий ($\pm 30^\circ$), то вірогідність видачі рішення “ВІДМОВА” біля 0.8. Примітно, що залежність вірогідності видачі рішення “ВІДМОВА” від ракурсу спостереження якісно співпадає з залежністю вірогідності правильних рішень (рис. 7). Найменше значення вірогідності видачі рішення “ВІДМОВА” відповідає спостереженню ПО з бортового ракурсу. Це явище цілком зрозуміле. При спостереженні ПО з бортових ракурсів відбувається скорочення РЛДП і вони становляться більш схожими один на одного.

Дослідження також показали, що вірогідність видачі рішення “ВІДМОВА” суттєво залежить від типу невідомої цілі. На рис. 10 наведені графіки залежності видачі рішення “ВІДМОВА” від ракурсу спостереження у випадках, коли невідомою ціллю був бомбардувальник В-52 (суцільна лінія), винищувач F-15 (штрихова лінія) та ракета-пастка (точкова лінія).

Рис. 10. Залежність вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” при спостереженні невідомого ПО типу В-52 (суцільна лінія), F-15 (штрихова лінія), ракети-пастки (точкова лінія) від ракурсу спостереження

Видно, що вірогідність видачі рішення “ВІДМОВА” зменшується при зменшенні геометричного розміру цілі. Якщо виявлення ПО типу В-52, як невідомої цілі здійснюється майже достовірно, то виявлення ракети-пастки практично не здійснюється взагалі, і це при тому, що порогове значення коефіцієнту кореляції для ракети-паски найбільше (рис. 2). Для підвищення вірогідності видачі рішення “ВІДМОВА” по таких об’єктах, як ракети, необхідно використовувати сигнали з більшою шириною спектру, ніж 200 МГц.

Підсумкові показники якості розпізнавання кожної з 20 типів цілей наведено у табл. 2. В таблиці для кожного типу цілей наведено значення вірогідності правильного розпізнавання P_{np} , вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” при наявності еталонних даних P_v та вірогідності прийняття рішення “ВІДМОВА” при відсутності еталонних даних P_{vv} . Наведені дані отримані при усередненні за відношенням сигнал-шум в діапазоні 3–27 дБ та ракурсу спостереження ПО.

Таблиця 2

Підсумкові показники якості розпізнавання кожної з 20 типів цілей

Тип ПО	P_{np}	P_v	P_{vv}
Boeing 737	0.834	0.146	0.588
Boeing 737-800	0.861	0.145	0.69
Airbus A320-200	0.88	0.139	0.699
B-52	0.976	0.186	0.944
B-1B	0.813	0.19	0.687
Ty-16	0.953	0.165	0.892
F-15	0.825	0.136	0.53
F-16	0.898	0.1	0.431
Tornado	0.841	0.159	0.686
Su-27	0.837	0.156	0.665
МиГ-29	0.828	0.119	0.498
МиГ-21	0.843	0.143	0.601
Su-24	0.802	0.174	0.612
Ан-26	0.831	0.151	0.697
АН-64	0.981	0.15	0.683
КТ-1	0.896	0.092	0.511
Cessna 172	0.877	0.093	0.37
ALCM	0.55	0.099	0.297
GLCM	0.712	0.104	0.304
Ракета-пастка	0.897	0.082	0.079

Результати моделювання показують, що кореляційний алгоритм розпізнавання ПО з відмовами забезпечує високу достовірність розпізнавання. Вірогідність правильного розпізнавання практично для всіх типів цілей перевищує 0.8. Виключення складають крилаті ракети. Вірогідність розпізнавання ракети GLCM – 0.712, а ракети ALCM усього 0.55. Це свідчить про те, що розрізняльній спроможності по дальності 0.75 м не вистачає для надійного розпізнавання типів ракет. Для їх надійного розпізнавання необхідно використовувати сигнали з шириною спектру більше 200 МГц. Цікаво, що при розпізнаванні крилатої ракети GLCM вірогідність прийняття помилкового рішення на користь крилатої ракети ALCM склала 0.105, а на користь ракети-пастки – 0.094. При розпізнаванні крилатої ракети ALCM вірогідність помилкового рішення на користь ракети GLCM склала 0.131, а на користь ракети-пастки – 0.247. Тобто, якщо цілі типу GLCM, ALCM та ракета-пастка об’єднати в один клас “РАКЕТА”, то при розпізнаванні крилатої ракети GLCM рішення “РАКЕТА” буде прийматися з вірогідністю 0.911, а при розпізнаванні ракети ALCM з вірогідністю 0.928! Хоча при розпізнаванні 20 типів ПО, коли вірогідність вгадування дорівнює $1/20=0.05$, вірогідність правильного розпізнавання 0.55 є непоганим показником.

Висновки

Практика радіолокаційного розпізнавання ПО показує, що алгоритм розпізнавання повинен, крім рішень на користь одного з типів цілей, приймати

рішення “ВІДМОВА”. Такий алгоритм запобігає збільшенню вірогідності прийняття помилкових рішень при зменшенні відношення сигнал-шум та при спробі розпізнавання цілей невідомих типів. В запропонованому кореляційному алгоритмі рішення “ВІДМОВА” приймається у випадку, коли максимальне значення коефіцієнту кореляції прийнятого РЛДП з еталонними РЛДП менше визначеного порогу. Моделювання роботи алгоритму розпізнавання

з відмовами показало, що він забезпечує запобігання зниження вірогідності прийняття помилкових рішень при зменшенні відношення сигнал-шум. Вірогідність виявлення цілі невідомого типу склала 0.57. Вірогідність може бути збільшена при використанні сигналів з більшою, ніж 200 МГц, шириною спектру. Також алгоритм забезпечує зростання, хоча і невелике, якості розпізнавання цілей відомих типів.

Список літератури

1. О первых отечественных исследованиях по широкополосной радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Б. Алмазов, В.Н. Голиков, В.И. Гомозов и др. // Радиотехника и электроника. – 1991. – № 8. – С. 96-100.
2. Лещенко С.П. Развитие теории и техники радиолокационного распознавания воздушных целей / С.П. Лещенко // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8, № 4. – С. 490-497.
3. Небабин В.Г. Методы и техника радиолокационного распознавания / В.Г. Небабин, В.В. Сергеев. – М.: Радио и связь, 1984. – 152 с.
4. Справочник. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теории / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 511 с.
5. Computer simulation of aerial targets radar scattering, recognition, detection, and tracking / Y.D. Shirman, S.F. Gorshkov, S.H. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy. – Boston-London: Artech House, 2002. – 294 p.
6. Tait P. Introduction to Radar Target Recognition / P. Tait. – London: Institution of Engineering and Technology, 2005. – 404 p.
7. Ширман Я.Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко, В.М. Орленко // Зарубежная электроника. – 1996. – № 11. – С. 3-63.
8. Лещенко С.П. Радиолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів по їх дальнісним портретам та залученням додаткових ознак / С.П. Лещенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 2(39). – С. 83-92. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.10>.
9. Hudson S. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles / S. Hudson, D. Psaltis // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1993. – Vol. 29, No. 3. – P. 741-748.
10. Лещенко С.П. Вплив ракурсу спостереження повітряних об'єктів на якість їх радіолокаційного розпізнавання / С.П. Лещенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2018. – № 4(33). – С. 60-68. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.33.08>.
11. Jouny I. Classification of radar target using synthetic neural network / I. Jouny, F. Garber, S. Ahalt // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1993. – Vol. 29, No. 2. – P. 336-344.
12. Radar HRRP Target Recognition Based on Concatenated Deep Neural Networks / Kuo Liao, Jsnxiu Si, Fangqi Zhu, Xudong He // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 29211-29218.
13. Лещенко С.П. Информативность и достоверность распознавания воздушных целей по их дальностным портретам / С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХВУ. – Харків: ХВУ, 2001. – Вип. 7(37). – С. 69-72.
14. Филимонов А.Б. Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей / А.Б. Филимонов, Фам Фыонг Кыонг // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Том 17, № 4. – С. 273-281. <https://doi.org/10.17587/mau.17.273-281>.
15. Jiansheng F. Radar HRRP Recognition Based on Discriminant Information Analysis / F. Jiansheng, D. Xiaohong, Y. Wanlin // Wseas Transactions on Information Science and Applications. – April 2011. – Issue 4, Vol. 8. – P. 185-201.
16. Qiusheng L. Classification of aircraft targets with surveillance radars based on fuzzy fractal Features / L. Qiusheng, X. Weixin // Progress in Electromagnetics Research M. – 2013. – Vol. 29. – P. 65-77. <https://doi.org/10.2528/PIERM12121601>.
17. Филимонов А.Б. Динамическое распознавание воздушных целей по радиолокационным дальностным портретам / А.Б. Филимонов, Фам Фыонг Кыонг // Информационные технологии. – 2016. – Том 22, №6. – С. 423-430.
18. Лещенко С.П. Вплив помилок виміру швидкості та ракурсу повітряних об'єктів на якість їх розпізнавання при використанні радіолокаційних дальнісних портретів / С.П. Лещенко // Системи озброєння і військова техніка. – 2019. – № 4(60). – С. 23-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.60.03>.
19. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / S.A. Gorshkov, S.P. Leschenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, Y.D. Shirman. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.
20. Лещенко С.П. Информационный показатель качества систем радиолокационного распознавания / С.П. Лещенко // Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 11. – С. 64-66.
21. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В. Кузьмин, В.А. Кедров. – Київ: Вища школа, 1986. – 239 с.

References

1. Shirman, Ya.D., Almazov, V.B., Golikov, V.N. and Gomofov, V.I. (1991), “O pervykh otechestvennykh issledovaniyakh po shirokopolosnoy radiolokatsii” [About the first domestic studies on broadband radar], *Radio engineering and electronics*, No. 8, pp. 96-100.

2. Leshchenko, S.P. (2009), "Razvitiye teorii i tekhniki radiolokatsionnogo raspoznavaniya vozdukhnykh tseley" [Development of the theory and technology of radar recognition of air targets], *Applied Radio Electronics*, Vol. 8, No. 4, pp. 490-497.
3. Nebabin, V.G. and Sergeev, V.V. (1984), "Metody i tekhnika radiolokatsionnogo raspoznavaniya" [Methods and technique of radar recognition], Radio and communication, Moscow, 152 p.
4. Shirman, Ya.D. (2007), "Spravochnik. Radioelektronnyye sistemy. Osnovy postroyeniya i teorii" [Reference. Radio electronic systems. Basics of construction and theory], Radio engineering, Moscow, 511 p.
5. Shirman, Y.D., Gorshkov, S.A., Leshchenko, S.P., Orlenko, V.M., Sedyshev, S.Y. and Sukharevskiy, O.I. (2002), *Computer simulation of aerial targets radar scattering, recognition, detection, and tracking*, Artech House, Boston-London, 294 p.
6. Tait, P. (2005), *Introduction to Radar Target Recognition*, Institution of Engineering and Technology, London, 404 p.
7. Shirman, Ya.D., Gorshkov, S.A., Leshchenko, S.P., Bratchenko, G.D. and Orlenko, V.M. (1996), "Metody radiolokatsionnogo raspoznavaniya i ikh modelirovaniye" [Methods of radar recognition and their modeling], *Foreign electronics*, No. 11, pp. 3-63.
8. Leshchenko, S.P. (2020), "Radiolokatsiine rozpoznavannia povitrianykh ob'ektiv po yikh dalnisnym portretam ta zaluchenniam dodatkovykh oznak" [Radar recognition of air objects by their long-range portraits and the involvement of additional features], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(39), pp. 83-92. <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.10>.
9. Hudson, S. and Psaltis, D. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles, *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems*, Vol. 29, No. 3, pp. 741-748.
10. Leshchenko, S.P. (2018), "Vplyv rakursu sposterezheniya povitrianykh ob'ektiv na yakist' yikh radiolokatsiynoho rozpoznavannya" [Influence of aerial view of aerial objects on the quality of their radar recognition], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 4(33), pp. 60-68. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.33.08>.
11. Jouny, I., Garber, F. and Ahalt, S. (1993), Classification of radar target using synthetic neural network, *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems*, Vol. 29, No. 2, pp. 336-344.
12. Kuo Liao, Jsnxiu Si, Fangqi Zhu and Xudong He (2018), Radar HRRP Target Recognition Based on Concatenated Deep Neural Networks, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 29211-29218.
13. Leshchenko, S.P. (2001), "Informativnost i dostovernost raspoznavaniya vozdukhnykh tseley po ikh dalnostnym portretam" [Informative and reliable recognition of air targets range profiles], *Collection of scientific papers KhMU*, Vol. 7(37), KhMU, Kharkiv, pp. 69-72.
14. Filimonov, A.B. and Fam Phuong Kyong (2016), "Metody fopmipovaniya infopmativnykh ppiznakov padiolokatsionnykh dal'nostnykh popptetov vozdukhnykh tseley" [Methods of forming informational indications of radar long-range portlets of air targets], *Mechatronics, Automation, Control*, Vol. 17, No. 4, pp. 273-281. <https://doi.org/10.17587/mau.17.273-281>.
15. Jiansheng, F., Xiaohong, D. and Wanlin, Y. (2011), Radar HRRP Recognition Based on Discriminant Information Analysis, *Wseas Transactions on Information Science and Applications*, Is. 4, Vol. 8, pp. 185-201.
16. Qiusheng, L. and Weixin, X. (2013), Classification of aircraft targets with surveillance radars based on fuzzy fractal Features, *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol. 29, pp. 65-77. <https://doi.org/10.2528/PIERM12121601>.
17. Filimonov, A.B. and Fam Phuong Kyong (2016), "Dinamicheskoye paspoznavaniye vozdukhnykh tseley po padiolokatsionnym dal'nostnym popptetam" [Dynamic Aerial Target Recognition by Radar Range Profiles], *Information Technology*, Vol. 22, No. 6, pp. 423-430.
18. Leshchenko, S.P. (2019), "Vplyv pomylok vymiru shvydkosti ta rakursu povitrianykh ob'ektiv na yakist' yikh rozpoznavannya pry vykorystanni radioloka-tsiinykh dalnisnykh portretiv" [The recognition quality effect of speed and aspect angle measurement errors using high range resolution profiles for aerial objects], *Systems of Arms and Military Equipment*, No. 4(60), pp. 23-30. <https://doi.org/10.30748/soivt.2019.60.03>.
19. Gorshkov, S.A., Leschenko, S.P., Orlenko, V.M., Sedyshev, S.Y. and Shirman, Ya.D. (2002), *Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual*, Artech House, Boston-London, 71 p.
20. Leshchenko, S.P. (1996), "Informacionnyj pokazatel kachestva sistem radiolokaczionnogo raspoznavaniya" [Information indicator of the quality of radar recognition systems], *Foreign electronics. The successes of modern radio electronics*, No. 11, pp. 64-66.
21. Kuzmin, I.V. and Kedrus, V.A. (1986), "Osnovy teorii informatsii i kodirovaniya" [Fundamentals of information theory and coding], High school, Kyiv, 239 p.

Надійшла до редколегії 04.08.2020

Схвалена до друку 15.09.2020

Відомості про автора:**Лещенко Сергій Петрович**

доктор технічних наук професор
 провідний науковий співробітник Харківського
 національного університету Повітряних Сил
 ім. І. Кожедуба,
 Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-3006-2822>

Information about the author:**Sergiy Leshchenko**

Doctor of Technical Sciences Professor
 Lead Research of Ivan Kozhedub
 Kharkiv National
 Air Force University,
 Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3006-2822>

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ДАЛЬНОСТНЫМ ПОРТРЕТАМ С ОТКАЗАМИ

С.П. Лещенко

Приводятся результаты исследования радиолокационного распознавания воздушных объектов по их дальностным портретам с использованием корреляционного алгоритма. В качестве основного признака распознавания рассматривается радиолокационный дальностный портрет, который получается при использовании зондирующих сигналов с высокой разрешающей способностью по дальности. В качестве дополнительных признаков рассматривается траекторный признак и признак роторной модуляции. Особенностью работы корреляционного алгоритма является возможность формирования решения "отказ", кроме решений в пользу одного из типов целей, по которым производилось обучение системы. Такая особенность алгоритма уменьшает вероятность выдачи ошибочных решений при уменьшении отношения сигнал-шум или наблюдении цели неизвестного типа. Исследования выполнены методом математического моделирования. Исследование распознавания выполнялось для 20 типов воздушных объектов, которые включали турбореактивные самолеты, винтовые самолеты, вертолет и крылатые ракеты. Получены численные значения показателей качества распознавания типа воздушного объекта.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание воздушных объектов, качество распознавания, радиолокационный дальностный портрет, корреляционный алгоритм, математическое моделирование.

A CORRELATION ALGORITHM WITH DENIALS FOR RADAR RECOGNITION OF AERIAL OBJECTS USING THEIR RANGE PROFILES

S. Leshchenko

The research results for radar recognition of aerial objects by their range profiles using a correlation algorithm are carried out. As the main sign of recognition a radar range profile is considered. The range profiles are obtained using wideband sounding signals with high range resolution. As an additional signs a trajectory feature and a sign of jet engine modulation are considered. Feature of the correlation algorithm is the ability to return a decision "denial" in addition to decisions of choosing one of the target types which were in the system learning. The decision "denial" is returned by the algorithm when the maximum value of correlation coefficient between the received range profile and the reference profiles is less than specified threshold. Threshold values of correlation coefficient are determined at the learning stage for each aerial object type and aspect angle sector. Such feature of the algorithm reduces the probability of erroneous decisions at signal-to-noise ratio reduction or tracking target of unknown type. The research is carried out by mathematical modeling method. Calculation of signals scattered by aerial objects is realized using BSS program. The recognition is carried out for 20 types of aerial objects including turbojets (commercial and military), propeller airplanes, helicopters and cruise missiles. The work of the radar radiating a packet of sounding pulses with a spectrum width of 200 MHz and a wavelength of 10 cm is simulated in research. Each packet has 50 pulses. The quality factors for aerial object type recognition which depends on the signal-to-noise ratio and observation aspect angle have been obtained. The probability of correct recognition for aerial objects of the "aircraft" kind exceeds 0.8 for all types. The probability of correct recognition for the cruise missile type is about 0.6. The probability of the decision "denial" for observing an unknown type target is 0.57, and for observing targets from the nose aspect angle sector ($\pm 30^\circ$) it reaches the value of 0.8. Probability of the decision "denial" increases sharply at decrease of signal-to-noise ratio less than 4 dB for one pulse of the pack. On approaching the signal-to-noise ratio to 0 dB, the probability of the decision "denial" tends to 1.

Keywords: radar aerial object recognition, recognition quality, radar range profile, correlation algorithm, mathematical modeling.