Розвиток, бойове застосування та озброєння радіотехнічних військ

УДК 621.396.

DOI: 10.30748/nitps.2020.39.10

С.П. Лещенко

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

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ПО ЇХ ДАЛЬНІСНИМ ПОРТРЕТАМ ТА ЗАЛУЧЕННЯМ ДОДАТКОВИХ ОЗНАК

Наводяться результати дослідження радіолокаційного розпізнавання повітряних об'єктів по сукупності ознак. 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. Роторна модуляція відбитих радіолокаційних сигналів створюється відбиттям від швидкообертаючих елементів повітряних об'єктів – лопатей повітряних гвинтів та лопаток компресорів (турбін) турбореактивних двигунів. Дослідження виконані методом математичного моделювання. Дослідження розпізнавання виконувалися для 17 типів повітряних об'єктів, що включали турбореактивні літаки, гвинтові літаки та вертольоти. Отримані чисельні значення показників якості розпізнавання типу повітряного об'єкту з залученням додаткових ознак розпізнавання. Показано, що залучення додаткових ознак розпізнавання приводить до збільшення вірогідності прийняття правильних рішень та зменшення обчислювальних витрат.

Ключові слова: радіолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів, якість розпізнавання, радіолокаційний дальнісний портрет, траєкторні ознаки, роторна модуляція, 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, радіолокаційних дальнісних портретів (РЛДП). Як показали виконані дослідження [4–7], для вирішення задачі радіолокаційного розпізнавання найбільш підходить в якості ознаки РЛДП. Радіо-

локаційний 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. Другим по інформативності радіолокаційного розпізнавання вважають ознаку роторної модуляції (РМ) (в англomовній літературі JEM – jet engine modulation) [6; 8]. Цілком природно виникає питання – а чи можна одночасно застосувати ці обидві ознаки розпізнавання? Проблемою для їх одночасного застосування є те, що умови отримання РЛДП та РМ є суттєво різними. Для отримання РЛДП потрібно використовувати імпульсні широкосмугові сигнали. Для отримання РМ необхідні вузькосмугові сигнали великої протяжності. Ідеальним є безперервний монохроматичний сигнал. На теперішній час автору невідомі роботи, в яких розглядається одночасне використання РЛДП та РМ для вирішення задачі радіолокаційного розпізнавання.

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 роботи [9–18]. Для прийняття рішень автори розгляда-

ють різні алгоритми. Найбільш часто пропонується використання кореляційних алгоритмів [9–10; 13; 18] або алгоритмів на основі нейромереж [11–12]. Розпізнаванню ПО за ознакою РМ присвячені роботи [8; 19–25]. В фундаментальній роботі [8] наводяться результати досліджень та експериментальних робіт по використанню РМ для розпізнавання класів ПО в радіолокаційних засобах зенітних ракетних комплексів. В роботах [20; 25] наводяться результати натурних експериментів з отримання спектрів РМ. В роботах [21–24] наводяться методи математичного моделювання для отримання спектрів РМ. В роботі [19] наводяться результати моделювання розпізнавання ПО з використанням ознаки РМ.

Мета статті – розробка методу та алгоритму радіолокаційного розпізнавання ПО, використовуючи в якості основної ознаки РЛДП, а в якості допоміжних – РМ та траєкторну ознаку.

Виклад основного матеріалу

Спектр роторної модуляції та умови його отримання. Поява РМ обумовлена відбиттям радіолокаційних сигналів від швидкообертаючих елементів конструкції ПО – лопатей повітряних гвинтів вертольотів і гвинтових літаків та лопаток компресорів (турбін) турбореактивних літаків (ракет). Якщо повітряний гвинт (компресор або турбіну) представити у вигляді моделі з N “блискучих” точок з однаковою ефективною поверхнею розсіювання (ЕПР), що розташовані рівномірно по колу радіусом R та які обертаються зі швидкістю Ω , відбитий сигнал може бути записаний у вигляді [24]:

$$y(t) = U_0 N J_0(Z) + U_0 N \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} J_{kN}(Z) \sin[(\omega_0 + kN\Omega)t], \quad (1)$$

$$Z = 4\pi R / \lambda,$$

де U_0 – амплітуда відбитого сигналу від однієї блискучої точки, ω_0 – кругова несуча частота.

З (1) витікає, що спектр сигналу, що відбитий від багатоточкової обертаючої структури, складається з сукупності гармонік, що відстоять друг від друга на частоту $N\Omega$. Амплітуди гармонік визначаються значеннями функції Бесселя різних порядків від аргументу пропорційному електричному розміру радіусу обертання, тобто електричному розміру лопаті повітряного гвинта (лопатки турбореактивного двигуна). Аналізуючи розмір та кількість лопатей повітряних гвинтів та вертольотів [24], можна зробити висновок, що для спостереження спектру РМ необхідно щоб довжина хвилі зондуючих сигналів була менша за 1.6 метру. Аналізуючи розмір та кількість лопаток компресорів і турбін турбореактивних двигунів літаків, безпілотних літальних апаратів та крилатих ракет [24], можна зробити висновок, що

для спостереження спектру РМ від турбін двигунів будь-якої цілі необхідно мати довжину хвилі не більшу за 1 см. Для спостереження спектру РМ від турбін двигунів будь-яких літаків необхідно, щоб довжина хвилі не перевищувала 5 см. Для спостереження спектру РМ від компресору двигуна будь-якого літака необхідно мати довжину хвилі не більшу за 10-12 см. В той же час спектр РМ від компресорів двигунів великих літаків може спостерігатися при довжині хвилі до 40 см. Порядок ширини спектру РМ можна визначити виходячи з того, що діапазон частот, в якому зосереджений спектр РМ, визначається максимальним значенням частоти Доплера, а максимальна лінійна швидкість дальнього кінця лопаті (лопатки) обмежена значенням 240...300 м/с. Тоді можна записати:

$$\Delta F = 4V_{r\max} / \lambda \approx 1120 / \lambda [\text{Гц}]. \quad (2)$$

Вираз (2) записано з урахуванням того, що в структурі, що обертається, присутні елементи, які набігають та тікають. Це приводить до розширення спектру у два рази. Відповідно можна розрахувати кількість спектральних ліній в спектрі РМ:

$$M = \Delta F / N\Omega \approx 1120 / \lambda N\Omega.$$

“Ідеальним” зондуючим сигналом для спостереження спектру РМ є безперервний монохроматичний сигнал, але в більшості РЛС використовуються імпульсні зондуючі сигнали. Для однозначного (без перекручування) представлення спектру РМ, згідно з теоремою відліків необхідно, щоб частота повторення імпульсів F_n щонайменше у два рази перевищувала ширину спектру РМ. Тоді, з урахуванням (2) можна записати вимоги до значення частоти повторення:

$$F_n > 2240 / \lambda [\text{Гц}]. \quad (3)$$

Раніш було вказано, що спектр РМ складається зі спектральних ліній, які розташовані з інтервалами $N\Omega$. Для вирішення задачі розпізнавання за ознакою РМ необхідно розрізняти окремі спектральні лінії. Відповідно розрізнявальна здатність за частотою δ_f повинна бути менша за $N\Omega$. Враховуючі те, що розрізнявальна спроможність за частотою визначається часом спостереження, можливо записати умову для мінімального часу спостереження за ціллю:

$$T_{\min} > 1 / (N\Omega)_{\min}. \quad (4)$$

Відбиття від реальних повітряних гвинтів та компресорів (турбін) має дещо складніший характер, ніж наведений тут модельний приклад відбиття від структури з N “блискучих” точок. ЕПР окремої лопаті (лопатки) при зміні її орієнтації може суттєво змінюватися. Особливо це стосується відбиття від несучого гвинта вертольоту [6]. В результаті, окрім фазової модуляції відбитого сигналу за рахунок руху лопаті (лопатки), буде спостерігатися амплітудна модуляція. Це може приводити до розширення спектру РМ за межі, що визначені (2). На вертольотах, як правило,

встановлено несучий та рульовий гвинти, які мають суттєво різні розміри, кількість лопатей та швидкість обертання. Спектри РМ від цих гвинтів будуть різними. На багатомоторних літаках двигуни, як правило, однакові, але швидкість їх обертання може дещо відрізнятися, що буде приводити до “розмивання” окремих спектральних складових. Експериментальні дослідження [8] показали, що відбиття радіолокаційних сигналів від компресорів (турбін) турбореактивних двигунів спостерігається не тільки від перших ступенів, а і від других. Швидкість обертання першої та другою ступенів компресору (турбіни) однакова, але кількість лопаток, як правило, відрізняється. Тому положення спектральних ліній відбитих сигналів від різних ступенів буде різною. Крім того, це приводить до появи комбінаційних складових у спектрі РМ. Додаткову складність для вирішення задачі розпізнавання вносить зміна швидкості обертання при зміні тяги турбореактивних двигунів. Швидкість обертання може змінюватися від -50% до +5% від номінальних. Крім того, на бокових ракурсах спостереження крильчатки турбореактивних двигунів затінюються корпусом і РМ не проявляється.

Викладене підтверджується результатами експериментальних досліджень [8; 20; 25] та досліджень, що виконані методом математичного моделювання [19; 21–24].

Метод поєднання ознаки РЛДП та РМ. Як відомо, єдиною умовою отримання РЛДП є використання зондуючих сигналів з шириною спектру 100...300 МГц [5–7]. Формально, якщо випромінювати такі зондуючі сигнали з дотриманням вимог (3–4) після спектральної обробки луна сигналів в кожному елементі розрізнення по дальності можливо отримати дальнісно-частотний портрет цілі [2; 8]. Приклад такого портрету [2] наведено на рис. 1.

Рис. 1. Дальнісно-частотний портрет моделі літака Ан-26

На рис. 1 стрілкою показано напрямок опромінення. Близький до РЛС гвинт повністю відкритий і створює двосторонній спектр РМ. Нижня частина дальнього гвинта закрита фюзеляжем літака і тому створює односторонній спектр РМ.

На практиці отримання дальнісно-частотного портрету пов'язане зі значними складнощами. По-перше, згідно з (2) при довжині хвилі 10 см частота повторення повинна бути не менш 22,4 кГц, а в оглядових РЛС частота повторення варіює в діапа-

зоні 200...1500 Гц. Відповідно спектр РМ буде мати значні перекручування. По друге, для отримання спектру РМ за час спостереження T літак не повинен пролітати уздовж лінії візування відстань більшу ніж елемент розрізнення по дальності δr . Це дозволяє записати умову отримання дальнісно-частотного портрету:

$$V_r T < \delta r,$$

де V_r – радіальна складова швидкості.

Враховуючи, що час спостереження повинен відповідати умові (4), а розміри елементу розрізнення по дальності визначаються шириною спектру ΔF , можна записати вимоги до максимального значення радіальної складової швидкості літака

$$V_r < \frac{c(N\Omega)_{\min}}{2\Delta F}, \quad (5)$$

де c – швидкість світла.

Розрахунки показують, що, наприклад, при спостереженні вертольоту АН-64 з чотирьохлопатевою ($N=4$) несучим гвинтом, який обертається зі швидкістю $\Omega=6$ Гц, та використанні ширококутових зондуючих сигналів з шириною спектру $\Delta F=200$ МГц, радіальна складова швидкості не повинна перевищувати 0,2 м/с. Зрозуміло, що повітряні об'єкти не можуть летіти з такою малою швидкістю. Отримання дальнісно-частотного портрету повітряного об'єкту можливо тільки у окремих випадках – спостереження цілей під бортовим ракурсом, коли радіальна швидкість наближається до нуля, або по вертольотам, що зависають. В загальному випадку на практиці отримання дальнісно-частотного портрету, що наведено на рис. 1, неможливо. Портрет на рис. 1 отримано в модельних умовах, коли зміщення цілі уздовж лінії візування не моделювалося.

Обробка пачки ширококутових сигналів передбачає компенсацію зсуву цілі по радіальній дальності за час накопичення [18]. При цьому крок вирівнювання РЛДП відповідає кроку дискретизації по дальності. Дискретна обробка при вирівнюванні РЛДП створює псевдо амплітудну модуляцію, схожу на РМ. Природа цієї модуляції пов'язана з тим, що відліки дискретизації накладаються на сигнал випадковим образом. Це приводить до того, що оцінка максимальної амплітуди сигналу здійснюється з помилками. Глибина такої псевдо модуляції A_m (рис. 2) пропорційна амплітуді сигналу та кроку дискретизації по дальності (часу). Враховуючи те, що оцінка радіальної швидкості для компенсації зсуву виконується з помилками, глибина псевдо амплітудної модуляції буде ще більша.

При вирівнюванні РЛДП втрачається інформація про фазу сигналу. Тому окремі РЛДП обробляються некогерентно.

Враховуючи перелічені фактори, можна стверджувати, що отримати якісний спектр РМ одночасно

з отриманням РЛДП неможливо. Відповідно не можуть бути застосовані відомі методи розпізнавання по спектрам РМ [8; 19].

Рис. 2. Природа появи псевдо амплітудної модуляції

Для використання РМ в інтересах вирішення задачі розпізнавання при отриманні РЛДП необхідно застосовувати більш прості, (але і менш інформативні) ознаки, ніж спектр РМ. Однією з таких ознак є оцінка середньоквадратичних відхилень (СКВ) відліків амплітуди РЛДП. При отриманні пачки з N РЛДП та виконанні компенсації їх зсуву по радіальній дальності [18], розрахунок СКВ в j -му відліку виконується по відомим співвідношенням

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{ij} - M_j)^2},$$

$$M_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{ij}.$$

На рис. 3 наведено приклад розрахунку середніх значень відліків РЛДП (рис. 3, а) та їх СКВ (рис. 3, б) для моделі літака F-16, що спостерігається з переднього ракурсу. РЛДП отримано з використанням моделі BSS [26]. Довжина хвилі РЛС при моделюванні – 10 см, ширина спектру сигналу – 200 МГц. Відношення сигнал-шум в кожному окремому РЛДП – 10 дБ. На рис. 3, а стрілкою показано відбиття від компресору турбореактивного двигуна, де створюється РМ. Як видно з рис. 3, б, для цієї ділянки дальності значення СКВ значно більше, ніж для інших ділянок.

Рис. 3. Середні значення РЛДП літака F-16 (а) та СКВ РЛДП (б) при спостереженні з переднього ракурсу

На рис. 4 наведено приклад аналогічних розрахунків, але при спостереженні літака F-16 з заднього ракурсу.

Рис. 4. Середні значення РЛДП літака F-16 (а) та СКВ РЛДП (б) при спостереженні з заднього ракурсу

На такому ракурсі спостерігається не компресор, а турбіна двигуна. Як було зазначено вище, при довжині хвилі зондуючого сигналу 10 см, РМ від турбіни двигуна не утворюється. Тому графіки середніх значень та СКВ РЛДП схожі. СКВ РЛДП в цьому випадку породжується псевдо амплітудною модуляцією та впливом шумів.

Математично вектори середніх значень та СКВ РЛДП представляються однаково. Формально це дозволяє для рішення розпізнавання використовувати однакові алгоритми як для середнього РЛДП так і значень СКВ РЛДП, наприклад кореляційні [10; 18]. При використанні в якості ознаки значень СКВ РЛДП, на етапі навчання необхідно отримати їх еталонні значення. На етапі розпізнавання розраховуються коефіцієнти кореляції з еталонними векторами. Рішення приймається на користь того типу цілі, з еталонним вектором якого отримано найбільше значення кореляції.

Подальше моделювання розпізнавання показало, що якість розпізнавання по векторам СКВ РЛДП дещо гірша за розпізнавання по РЛДП. Відповідно і об'єднання цих двох ознак не приводило до покращення якості розпізнавання. Тобто у такий спосіб використання такої ознаки як СКВ РЛДП недоцільно. Але при проведенні статистичної обробки було звернуто увагу на співвідношення відношень сигнал-шум у векторах середніх значень та СКВ РЛДП. Якщо уважно придивитися на наведені приклади розрахунків векторів середніх значень та СКВ РЛДП (рис. 3–4), можна побачити, що відношення сигнал-шум на рис. 3 у векторі СКВ РЛДП вище, ніж у векторі середніх. На рис. 4 спостерігається зворотна картина. У прикладі, показаному на рис. 3, присутня РМ, а на рис. 4 – ні. Тобто можливо зробити висновок про те, що чим більший внесок РМ у відбитий сигнал, тим більше буде відношення сигнал-шум у векторі СКВ РЛДП S_σ по відношенню до

відношення сигнал-шум у векторі середніх значень РЛДП S_m . Відповідно, у якості додаткової ознаки розпізнавання що породжується явищем РМ можливо використовувати значення різниці відношень сигнал-шум векторів СКВ та середніх значень РЛДП:

$$S = S_g - S_m. \quad (6)$$

Рис. 5. Діапазони варіювання ознаки S_d при спостереженні з заднього ракурсу

Як видно з рис. 5, діапазон варіювання ознаки S_d вертольоту АН-64 не перетинається з діапазонами варіювання ознаки від реактивних літаків і частково перетинається з діапазоном ознаки від гвинтових літаків АН-26, КТ-1 та Cessna-172. Діапазони варіювання ознаки по реактивним літакам перетинаються у значному ступеню. З огляду на отриманий результат можна зробити висновок, що використовувати ознаку S_d в якості основної недоцільно, а в якості додаткової – можливо. Таким чином, можна запропонувати модифікацію відомого кореляційного алгоритму розпізнавання ПО по їх РЛДП [10; 18]:

- При виконанні процедури некогерентного накопичення РЛДП з урахуванням радіальної складової швидкості [18] обчислювати не тільки РЛДП, в й вектор СКВ РЛДП. Розраховувати значення різниці відношення сигнал-шум між РЛДП та СКВ РЛДП S (6).

- На етапі навчання системи розпізнавання, крім обчислення еталонних РЛДП у визначених ракурсних секторах, оцінювати діапазон варіювання показника S_d .

- На етапі безпосередньо розпізнавання перевіряти попадання показника S у діапазон S_d . Якщо показник виходить за межі діапазону – виключати гіпотезу про належність прийнятої реалізації до відповідного типу цілі і не розраховувати значення кореляції з відповідними еталонним РЛДП.

Слід зауважити, що за рахунок того, що кореляція буде обчислюватися не зі всіма еталонними портретами, обчислювальна складність модифікованого алгоритму буде дещо знижена.

Результати математичного моделювання розпізнавання при залученні РМ в якості додаткової ознаки. Для розрахунку РЛДП використову-

Для підтвердження сказаного шляхом математичного моделювання було оцінено значення діапазонів варіювання ознаки $S_d = S_{min} \dots S_{max}$ при статистичній обробці даних по 17 типам ПО. Отримані значення наведено на рис. 5 для випадку спостереження з заднього ракурсу при ширині спектру зондуючого сигналу 200 МГц та довжині хвилі 10 см.

валася математична модель “BSS” [5; 26], що забезпечує виконання розрахунків відбитих радіолокаційних луна-сигналів від ПО визначених типів з урахуванням ракурсів їх спостереження. Всього були використані математичні моделі повітряних об'єктів 17 типів: важкі реактивні бомбардувальники (B-52, B-1B, Tu-16), літаки тактичної авіації (F-15, F-16, Tornado, Су-27, МиГ-29, МиГ-21), транспортний гвинтовий літак (АН-26), комерційні літаки (Boeing-737, Airbus A320), ударний вертоліт (АН-64), легкомоторні гвинтові літаки КТ-1 та Cessna-172, крилаті ракети ALCM та GLCM.

Моделювалася робота РЛС з наступними параметрами: довжина хвилі – 0,1 метру, частота повторення – 1 кГц, тип сигналу – лінійно-частотно модульований з шириною спектру 200 МГц. Такий сигнал забезпечує розрізняльну спроможність по дальності 0,75 метру що значно менше геометричних розмірів всіх ПО. Довжина строби спостереження складала 100 метрів. Частота дискретизації дорівнювала 600 МГц, що гарантовано забезпечувало виконання вимог теореми відліків.

Математичне моделювання розпізнавання ПО складається з трьох етапів:

- отримання вибірки РЛДП по всіх ПО;
- виконання навчання системи розпізнавання;
- виконання контрольного розпізнавання та отримання значень показників якості розпізнавання.

Враховуючи те, що всі ПО мають осьову симетрію, дослідження по визначенню залежності якості радіолокаційного розпізнавання типу ПО від ракурсу спостереження 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 258400 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. Значення сигнал-шум обиралися випадково з рівномірними розподілом в діапазоні 3–27 дБ на один РЛДП пачки. Детектування зводилося до розрахунку модулю комплексних відліків РЛДП.

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 [7]. Всього використовувалося 19 ракурсних секторів. В кожному ракурсно-му секторі, для кожного типу ПО розраховувалося по 6 еталонних РЛДП, тобто всього було розраховано $19 \times 17 \times 6 = 1938$ еталонних РЛДП. Крім того, для кожного типу цілей та кожного ракурсу розраховувався діапазон різниць відношення сигнал-шум S_d . Таких діапазонів було оцінено $19 \times 17 = 323$.

Для визначення якості системи розпізнавання отримувалася матриця розпізнавання [10; 18]. Елементами матриці є умовні вірогідності $P(i|k)$ прийняття рішення про приналежність об'єкту i -го типу до типу k . Також оцінювалися два скалярних показники – безумовна вірогідність правильного розпізнавання та кількість інформації розпізнавання. Обидва показники розраховуються з елементів матриці розпізнавання. Безумовна вірогідність правильного розпізнавання (або просто вірогідність розпізнавання) P_{np} розраховується як середнє арифметичне діагональних елементів матриці розпізнавання

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

Кількість інформації розпізнавання у лінійній шкалі розраховується за виразом

$$J = 2^I,$$

де [27]:

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

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

Фізично показник J показує еквівалентну кількість типів (класів), що розпізнаються достовірно. В нашому випадку при розпізнаванні 17 типів ПО максимально можливе значення $J = 17$. Це значення буде досягнуто при достовірному розпізнаванні усіх типів ПО. Мінімумально можливе значення $J = 2^0 = 1$.

В результаті виконаного моделювання були отримані наступні результати (усереднені по ракурсам спостереження та типам ПО): вірогідність розпізнавання тільки по РЛДП $P_{np} = 0.783$, кількість інформації розпізнавання $J = 6.254$. Вірогідність розпізнавання по РЛДП та РМ $P_{np} = 0.793$, кількість інформації розпізнавання $J = 6.504$. Зростання якості розпізнавання в основному забезпечено за рахунок зростання якості розпізнавання гвинтових цілей. Наприклад, вірогідність розпізнавання моделі літака Cessna-172 зросла з 0,82 до 0,86. Якість розпізнавання реактивних ПО практично не змінилася.

Траєкторна ознака. Практично всі РЛС здатні вимірювати параметри траєкторій повітряних об'єктів, що супроводжуються. Деякі РЛС вимірюють значення висоти, швидкості та прискорення по трьом координатам, але більшість РЛС забезпечують вимірювання тільки швидкості та висоти. Діапазони можливих значень висоти та швидкості для різних типів ПО суттєво перетинаються, тому в якості основної ознаки розпізнавання їх застосування недоцільне, але у якості додаткової ознаки їх застосування цілком виправдане. Наприклад, якщо ПО виконує політ на висоті 10000 метрів зі швидкістю 800 км/г, гіпотези що це вертоліт, або легкомоторний літак можна цілком виключити. Для застосування в якості додаткових ознак висоти та швидкості польоту, навчання системи розпізнавання зводиться до запам'ятовування значень мінімально та максимально можливої швидкості та максимальної висоти виконання польоту. Так як ПО здійснюють зліт та посадку з земної поверхні, то мінімальне значення висоти польоту дорівнює нулю. Для літаків мінімальне значення швидкості дорівнює посадковій швидкості. При використанні в якості основної ознаки РЛДП, розрахунок кореляції з відповідним еталоном необхідно здійснювати тільки у випадку, якщо вимірюні значення висоти та швидкості попадають у діапазон можливих значень. Тобто, застосування в якості додаткових ознак висоти швидкості дозволяє виключити деякі гіпотези (альтернативи) стосовно належності цілі. Це приводить як до зростання якості розпізнавання так і зменшенню обчислювальних

витрат. В табл. 1. наведено значення мінімальної V_{min} та максимальної V_{max} швидкості, а також максимальної висоти H_{max} польоту для 17 типів ПО, по яких здійснювалося моделювання розпізнавання. В таблиці також наведені значення крейсерських значень висоти $H_{кр}$ та швидкості $V_{кр}$. Якщо вважати, що політ здійснюється на крейсерських режимах, а на них здійснюється 90% польотного часу, то в останньому стовпчику таблиці приведено кількість можливих альтернатив про належність цілі.

Таблиця 1

Траєкторні ознаки
та кількість альтернатив розпізнавання

Тип ПО	V_{min}	V_{max}	H_{max}	$V_{кр}$	$H_{кр}$	$N_{альт}$
B-52	220	1100	16000	850	9000	11
B-1B	220	2300	19000	900	9000	11
Ty-16	240	1100	14000	850	9000	11
F-15	230	2700	20000	950	9000	11
F-16	230	2200	16000	950	9000	11
Tornado	230	2200	18000	950	9000	11
Su-27	230	2600	19000	950	9000	11
МиГ-29	230	2500	18000	950	9000	11
МиГ-21	260	2300	19000	950	9000	11
Boeing737	220	900	13000	900	9000	11
Airbus320	220	900	13000	900	9000	11
Ан-26	200	550	7400	450	4500	13
АН-64	0	270	6500	250	1500	14
КТ-1	150	600	12000	250	3500	13
Cessna172	70	240	4500	230	1500	13
ALCM	700	1000	2000	800	100	13
GLCM	700	1000	2000	800	100	13

Як видно з табл. 1, кількість альтернатив, що повинні розглядатися, варіює від 11 до 14 і в жодному випадку не розглядається їх максимальна кількість – 17.

Моделювання розпізнавання ПО по їх РЛДП з застосуванням в якості додаткових ознак висоти та швидкості для крейсерських режимів польоту показало, що вірогідність розпізнавання зростає з 0.783 до 0.834, а кількість інформації розпізнавання з 6.254. до 8.194, тобто досить суттєво.

Моделювання розпізнавання ПО по їх РЛДП з застосуванням в якості додаткових ознак висоти та швидкості для крейсерських режимів польоту та ознаки РМ показало, що вірогідність розпізнавання $P_{пр}$ зростає з 0.783 до 0.838 (на 7%), а кількість інформації розпізнавання J з 6.254. до 8.329 (на 33%).

На рис. 6 наведено графіки залежності вірогідності розпізнавання від ракурсу спостереження, усереднені за типами ПО та відношення сигнал-шум.

Номер ракурсу “0” відповідає спостереженню з заднього ракурсу, номер ракурсу “19” відповідає спостереженню з переднього ракурсу, номеру “10” відповідає спостереженню з борту. Аналіз графіків показує, що застосування траєкторних ознак у якості додаткових дає значно більший приріст якості розпізнавання, ніж ознака РМ. Але нехтувати цією ознакою все ж не варто. Як витікає з рис. 5, ознака РМ забезпечує в першу чергу виділення такого типу ПО як вертоліт. У нашому випадку моделювання, з використанням тільки ознаки РЛДП, вірогідність розпізнавання вертольоту вже склала 0.95, тобто “резерву” для збільшення вірогідності розпізнавання саме вертольоту майже не було. При розпізнаванні інших типів вертольотів ефект від застосування ознаки РМ може бути більшим. Крім того, саме для класу “вертоліт” застосування траєкторних ознак залишає максимальну кількість альтернатив і відповідно дає найменший позитивний вплив.

Рис. 6. Залежність вірогідності розпізнавання від ракурсу спостереження

Аналіз графіків показує, що ефект від застосування ознаки РМ дещо більший при спостереженні під задніми ракурсами, ніж передніми. Це пояснюється тим, що при довжині хвилі РЛС 10 см, РМ від

турбін не створюється, а від компресорів присутня. В такому випадку гвинтові цілі краще виділяються на фоні турбореактивних.

Якісна залежність вірогідності розпізнавання від ракурсу спостереження співпадає з результатами, наведеними в [10]. Застосування в якості додаткової ознаки траєкторних вимірів забезпечує максимальний ефект при спостереженні цілі під бортовим ракурсом, коли якість розпізнавання найгірша.

Висновки

Виконані дослідження показали, що при розпізнаванні ПО по їх РЛДП доцільно застосовувати додаткові, відносно “дешеві” ознаки, такі як ознака РМ та траєкторні. Застосування траєкторних ознак

дає більший ефект, ніж застосування ознаки РМ. Це пов'язано з тим, що умови отримання РЛДП не дозволяють отримувати спектр РМ, який є досить інформативною ознакою. В умовах отримання РЛДП доводиться використовувати непрямі методи застосування РМ зі значною втратою інформативності. Взагалі, за результатами моделювання, застосування додаткових ознак дозволяє підвищити вірогідність розпізнавання P_{np} на 7%, а кількість інформації розпізнавання J аж на 33%. Крім того, при використанні додаткових ознак дещо зменшуються обчислювальні витрати.

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. – Т8, №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. 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. Слюсарь Н.М. Радиолокационное распознавание, контроль состояний и действий целей в радиотехнических системах вооружения на основе вторичной модуляции отраженных сигналов / Н.М. Слюсарь. – Минск: ВА РБ, 2003. – 144 с.
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/ntps.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 // 36. 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. Target Classification from JEM Signal Using Frequency Masking / Si-Ho Kim, Chan-Hong Kim, Dae-Young Chae, Sang-In Lee // Progress in Electromagnetics Research M. – 2017. – Vol. 53. – P. 67-75.
20. Экспериментальные исследование информационных свойств когерентных радиолокационных сигналов / М.М. Черных, О.В. Васильев, А.В. Богданов, А.Н. Савельев, В.Е. Макаев. – Москва: Радиотехника. – 2000. – №3. – С. 47-54.
21. Метод чисельного моделювання спектрів гвинтової модуляції вертольотів / М.М. Бречка, Г.С. Залевський, В.О. Василець, О.І. Сухаревський // Системи обробки інформації. – 2012. – № 3(101), Том 2. – С. 13-17.
22. Комбинированный метод расчета характеристик рассеяния объектов сложной формы и его применение для моделирования спектров винтовой модуляции вертолетов / Г.С. Залевский, М.М. Бречка, В.А. Василец, О.И. Сухаревский // Системи обробки інформації. – 2014. – № 4 (120). – С. 80-85.
23. Кравцов С.В. Моделирование рассеяния электромагнитного поля на пропеллере аэродинамической цели / С.В. Кравцов, С.П. Лещенко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – № 4. – С. 39-44.

24. Лещенко С.П. К вопросу получения спектра вторичной модуляции и радиолокационного поперечного портрета быстровращающейся многолопастной структуры / С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХВУ. – Х: ХВУ, 1997. – Вип. 14. – С. 75-84.

25. Воробьев Е.Н. Исследование сигнальных признаков распознавания малых БПЛА в полуактивной РЛС / Е.Н. Воробьев // Вестник Новгородского государственного университета. – 2019. – № 4(116). – С. 72-77. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4\(116\).72-77](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77).

26. 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.

27. Лещенко С.П. Информационный показатель качества систем радиолокационного распознавания / С.П. Лещенко // Зарубежная электроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 11. – С. 64-66.

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 Sergeyev, 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. Slyusar, N.M. (2003), "Radiolokatsionnoye raspoznavanie, kontrol sostoyaniy i dejstviy tseley v radiotekhnicheskikh sistemakh vooruzheniya na osnove vtorichnoy modulyatsii otrazhennykh signalov" [Radar recognition, control of the states and actions of targets in radio systems of weapons based on the JEM of reflected signals], MA RB, Minsk, 144 p.

9. Hudson, S. and Psaltis, D. (1993), Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, Vol. 29, No. 3, pp. 741-748.

10. Leshchenko, S.P. (2018), "Vplyv rakursu sposterezhennya 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 Transactions 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 infopativnykh 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 rozpoznavannia 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. Si-Ho Kim, Chan-Hong Kim, Dae-Young Chae and Sang-In Lee (2017), Target Classification from JEM Signal Using Frequency Masking, *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol. 53, pp. 67-75.

20. Chernykh, M.M., Vasil'ev, O.V., Bogdanov, A.V., Savel'ev, A.N. and Makaev, V.E. (2000), "Eksperimentalnye issledovanie informatsionnykh svoystv kogerentnykh radiolokatsionnykh signalov" [Experimental study of information properties of coherent radar signals], *Radio engineering*, No. 3, Moscow, pp. 47-54.

21. Brechka, M.M., Zalevskiy, H.S., Vasylets, V.O. and Sukharevskiy, O.I. (2012), "Metod chyselnoho modeliuvannia spektriv hvyntovoi moduliatsii vertolotov" [Method for numerical modeling JEM of helicopter], *Information Processing Systems*, No. 3(101), Vol. 2, pp. 13-17.

22. Zalevskiy, H.S., Brechka, M.M., Vasylets, V.O. and Sukharevskiy, O.I. (2014), "Kombinirovannyj metod rascheta kharakteristik rasseyaniya ob'ektov slozhnoj formy i ego primenenie dlya modelirovaniya spektrov vintovoy modulyatsii vertole-

тов” [Combined method of calculation of scattering characteristics of complex objects and its application for modeling JEM of helicopter], *Information Processing Systems*, No. 4(120), pp. 80-85.

23. Kravczov, S.V. and Leshchenko, S.P. (1999), “Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnogo polya na propellere aerodinamicheskoy czeli” [Modeling the scattering of an electromagnetic field on a propeller of a aerodynamic target], *Electromagnetic waves and electronic systems*, No. 4, pp. 39-44.

24. Leshchenko, S.P. (1997), “K voprosu polucheniya spektra vtorichnoj modulyaczii i radiolokaczionnogo poperechnogo portreta bystrovrashhayushhejsya mnogolopastnoj struktury” [On the issue of obtaining a JEM and a ISAR of a rapidly rotating multi-blade structure], *Collection of scientific papers KhMU*, No. 14, KhMU, Kharkiv, pp. 75-84.

25. Vorob'ev, E.N. (2019), “Issledovanie signalnykh priznakov raspoznavaniya malykh BPLA v poluaktivnoj RLS” [The study of signal signs of recognition of small UAVs in a semi-active radar], *Bulletin of Novgorod State University*, No. 4(116), pp. 72-77. [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4\(116\).72-77](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2019.4(116).72-77).

26. Gorshkov, S.A., Leshchenko, 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.

27. Leshchenko, S.P. (1996), “Informaczionnyj 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.

Надійшла до редколегії 17.03.2020

Схвалена до друку 21.04.2020

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>

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ ДАЛЬНОСТНЫМ ПОРТРЕТАМ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПРИЗНАКОВ

С.П. Лещенко

Приводятся результаты исследования радиолокационного распознавания воздушных объектов по совокупности признаков. 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 рассматриваются траекторный признак и признак роторной модуляции. Роторная модуляция отраженных радиолокационных сигналов создается отражениями от быстровращающихся элементов воздушных объектов – лопастей воздушных винтов и лопаток компрессоров (турбин) турбореактивных двигателей. Исследования выполнены методом математического моделирования. Исследование распознавания проводилось для 17 типов воздушных объектов, которые включали турбореактивные самолеты, винтовые самолеты и вертолеты. Получены числовые значения показателей качества распознавания типа воздушного объекта при использовании дополнительных признаков распознавания. Показано, что привлечение дополнительных признаков распознавания приводит к увеличению вероятности правильного распознавания и уменьшению вычислительных затрат.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание воздушных объектов, качество распознавания, радиолокационный дальностный портрет, траекторные признаки, роторная модуляция, математическое моделирование.

RADAR RECOGNITION OF AIRBORNE OBJECTS BY HIGH-RESOLUTION RANGE PROFILE WITH ATTRACTION OF ADDITIONAL SIGNS

S. Leshchenko

The results for radar recognition of airborne objects by a set of signs are given. A high-resolution range profile (HRRP) is considered as the main sign of recognition. HRRP is obtained using probing signals with high resolution in range. As additional signs, the trajectory sign and the jet engine modulation (JEM) sign are considered. The JEM in scattered radar signals is created by reflections from fast rotating elements of airborne objects – the propeller blades and the blades of compressors (turbines) in turbojet engines. It is shown that the specifications of the radars designed to obtain HRRP do not allow to get the JEM spectra. It is proposed to use the difference between the estimates of the signal-to-noise ratio of the vectors of the average values of the HRRP and the standard deviation of the HRRP as an indirect sign associated with JEM. Also it is proposed to use estimates of the flight altitude and speed of the target trajectory signs. The recognition quality data have been obtained by mathematical modeling using the BSS program. The recognition was carried out for 17 types of airborne objects, included turbojet aircraft (11 types), propeller aircraft (3 types) and a helicopter. The recognition quality indicators of the airborne object type are obtained using additional recognition signs. HRRP is used as a main recognition sign. A correlation algorithm was used for recognition by this sign. The use of additional recognition signs allows to increase the probability of proper recognition up to 7% and the amount of recognition information up to 33%. The trajectory signs make the main contribution to improving the recognition quality. Moreover, the attraction of additional signs leads to a reduction in computing. The computing reduction is achieved due that some hypotheses about the target recognition were excluded using additional signs analysis before the calculation of the correlation coefficients with the reference HRRP.

Keywords: radar recognition of airborne objects, recognition quality, high-resolution range profile, trajectory features, jet engine modulation, mathematical modeling.