

С.П. Лещенко

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

ВПЛИВ РАКУРСУ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЯКІСТЬ ЇХ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ

Наводяться результати дослідження впливу ракурсу спостереження повітряних об'єктів на якість їх радіолокаційного розпізнавання. В якості ознаки розпізнавання розглядається радіолокаційний дальнісний портрет, що отримується при використанні зондуючих сигналів з високою розрізняювальною спроможністю по дальності. Дослідження виконані методом математичного моделювання. Дослідження розпізнавання виконувалися для 18 типів повітряних об'єктів. Отримані числові значення показників якості розпізнавання типу повітряного об'єкту.

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

Вступ

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми радіолокаційного розпізнавання повітряних об'єктів (ПО) досліджуються з 60-х років минулого століття [1–3]. Для вирішення цієї задачі досліджувалося використання різноманітних ознак: амплітудних, поляризаційних, спектрів вторинної модуляції, радіолокаційних дальнісних портретів (РЛДП). Як показали виконані дослідження [4–5] для розпізнавання типу ПО, а не його класу, найбільш підходить в якості ознаки РЛДП. Радіолокаційний дальнісний портрет (в англомовній літературі "range profile") отримується при використанні ширококутових радіолокаційних сигналів, що забезпечують розрізнення окремих елементів плануру ПО за дальністю. Для цього мінімальна ширина спектру повинна перевищувати 40 МГц. Безпосереднє прийняття рішень може бути реалізовано за допомогою кореляційних [6] або нейрокомп'ютерних алгоритмів [7; 13], або алгоритмів, що пов'язані зі специфічним перетворенням РЛДП [8], або алгоритмів, що використовують оцінки щільності розподілу амплітуд [10]. При подальших дослідженнях використовувався кореляційний алгоритм, що показав найбільшу стійкість до впливу розбіжностей умов при навчанні системи та її роботі.

Постановка проблеми. Основним недоліком більшості проведених досліджень є обмеженість кількості типів (класів) ПО, що розпізнаються, та обмеженість ракурсів їх спостереження. Кількість типів (класів), що розпізнавалися, в більшості випадків не перевищувала 2–4. Також дослідження обмежувалися найбільш "цікавим" ракурсом спостереження – атакуючим, коли повітряний об'єкт рухається в сторону радіолокаційної станції (РЛС). Вказані обмеження обумовлюються складністю отримання необхідних даних при натурних експеримен-

тах та відсутністю до недавніх часів адекватних математичних моделей розрахунку радіолокаційних луна-сигналів від ПО визначених типів з урахуванням особливостей їх конструкції.

Відомо, що РЛДП суттєво залежить від ракурсу спостереження ПО. Іноді зміна ракурсу ПО на доли градуса приводить до значної зміни форми РЛДП. Протяжність РЛДП при спостереженні ПО з "бортових" ракурсів скорочується. Слід очікувати, що при таких ракурсах спостереження якість розпізнавання буде погіршуватися. Деякі фахівці взагалі вважають, що при спостереженні ПО під бортовими ракурсами розпізнавання неможливе. Але до цього часу дослідження стосовно визначення залежності якості радіолокаційного розпізнавання від ракурсу спостереження ПО не проводилися.

Таким чином, **метою роботи** було виконання досліджень по визначенню залежності якості радіолокаційного розпізнавання типу ПО від ракурсу спостереження та точності виміру поточного курсу ПО. Дослідження виконувалися з використанням методів математичного моделювання, які в останній час отримали значного розвитку.

Виклад основного матеріалу

Стислий огляд математичної моделі розрахунку відбитих радіолокаційних сигналів. Для розрахунку РЛДП використовувалася математична модель "BSS" [9; 5], що забезпечує виконання розрахунків відбитих радіолокаційних луна-сигналів від ПО визначених типів з урахуванням 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

відбиттів від кожної апроксимуючої поверхні окремо. Також враховуються бортові антени та швидко обертаючі елементи конструкції ПО. До таких елементів належать лопатки компресорів і турбін турбореактивних літаків та лопаті повітряних гвинтів. Швидко обертаючі елементи створюють специфічну модуляцію луна-сигналів, що називають роторною або турбінною або пропелерною. З одного боку така модуляція є однією з ознак розпізнавання, а з іншого вона приводить до флуктуацій форми РЛДП і відповідно знижує якість розпізнавання.

Всього були розроблені математичні моделі повітряних об'єктів 18 типів: важкі реактивні бомбардувальники (B-52, B-1B, Tu-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, Airbus A320), ударний вертоліт (АН-64), легкомоторний гвинтовий літак (КТ-1), 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 – 400 Гц, тип сигналу – лінійно-частотно модульований з дзвіноподібною огинаючою та шириною спектру 200 МГц. Такий сигнал забезпечує розрізняльну спроможність по дальності 0,75 метру, що значно менше геометричних розмірів всіх ПО. Дзвіноподібна огинаюча забезпечує рівень бічних пелюсток стиснутого сигналу менше -40дБ. Як показали попередні дослідження [10], ширина спектру 200 МГц забезпечує найбільшу якість розпізнавання ПО. Довжина строби спостереження складала 100 метрів. Частота дискретизації складала 600 МГц, що гарантовано забезпечувало виконання вимог теорії відліків.

Моделювання радіолокаційного розпізнавання ПО складається з трьох етапів:

- отримання вибірки РЛДП по всіх ПО;
- виконання навчання системи розпізнавання, що при використанні кореляційного алгоритму зводиться до отримання набору еталонних РЛДП;
- виконання контрольного розпізнавання та отримання значень показників якості розпізнавання.

Отримання вибірки РЛДП. 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° – 180° , а не 0° – 360° . За допомогою математичної моделі "BSS" були отримані 4000 реалізації пачок радіолокаційних РЛДП. Кожна пачка вмішувала 20 окремих

РЛДП. При частоті повторення 400 Гц це відповідало часу одного контакту з ціллю 50 мс. При моделюванні враховувалося те, що ПО рухаються з крейсерською швидкістю, яка дорівнювалася 950 км/г для літаків F-15, F-16, Tornado, Су-27, МиГ-29, МиГ-21, 900 км/г для літаків B-1B, Boeing-737, Airbus A320, 850 км/г для літаків Су-24, Ту-16, B-52, 800 км/г для ракет ALCM, GLCM та ракети-пастки, 450 км/г для літака Ан26, 250 км/ч для вертольоту АН-64, 220 км/г для легкомоторного літака КТ-1. Наявність руху цілей приводить до зміщення окремих РЛДП в межах однієї пачки (виключаючи випадок спостереження ПО під бортовим ракурсом). В найгіршому випадку, при польоті ПО на (від) РЛС зі швидкістю 950 км/г за час контакту 50 мс зміщення РЛДП досягає 13 метрів, що не тільки на півтора порядку перевищує міру розрізнення по дальності (0,75 м), а дорівнює розміру деяких ПО. Усього було розраховано $4000 \times 20 = 80000$ РЛДП. Кожен РЛДП представлено у комплексному вигляді, тобто у двох квадратурах. Крок розвороту ПО за ракурсом між окремими пачками дорівнював $180^{\circ}/4000 = 0,045^{\circ}$. 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.

РЛДП, що отримані з виходу моделі BSS, ще не придатні для використання алгоритмами навчання та контрольного розпізнавання. З отриманою вибіркою РЛДП необхідно виконати обробку, що зазвичай виконується в приймальному пристрої РЛС, а саме: додати відліки шуму у заданому співвідношенні, продетектувати, здійснити некогерентне накопичування у межах однієї пачки РЛДП з урахуванням зміщення РЛДП, обумовленого наявністю радіальної швидкості ПО. Для виконання перелічених операцій було розроблено окреме програмне забезпечення. 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. З кожної вихідної пачки РЛДП розраховувалося три нові пачки. Для першої пачки значення сигнал-шум обиралося випадково з рівномірними розподілом в діапазоні 10–16 дБ, для другої пачки в діапазоні 17–23 дБ, для третьої в діапазоні 24–30 дБ.

Детектування зводилося до розрахунку модулю комплексних відліків РЛДП.

Для некогерентного накопичення необхідно компенсувати зміщення окремих РЛДП відносно друг друга. Для цього необхідно оцінити значення радіальної швидкості ПО. Оцінку радіальної швидкості можна виконувати різними методами. В на-

шому випадку оцінка здійснювалася з використанням кореляційного алгоритму [12]. Помилки оцінювання радіальної швидкості цим методом залежать від відношення сигнал-шум та типу ПО. Найбільші помилки спостерігалися для ПО, що здійснюють пропелерну модуляцію РЛДП. На рис. 1 наведено пачку непарних продетектованих РЛДП та накоплений РЛДП для літака Ту-16, а на рис. 2 – для літака Ан-26. Літаки здійснювали політ на РЛС під кутом приблизно 15–20°. На рисунках перший отриманий РЛДП пачки розміщений знизу, останній зверху. Видно, що за час спостереження ПО зміщується справа наліво, тобто дистанція між ПО та РЛС скорочується. Зміщення РЛДП для літака Ан-26 менше ніж для літака Ту-16, тому що його швидкість майже в два рази менша. Можна побачити, що форма РЛДП літака Ту-16 в межах пачки майже не змінюється, а для літака Ан-26 середня частина РЛДП має ярко виражені флуктуації, що обумовлені "пропелерною" модуляцією.

Таким чином, з урахуванням того, що кожна пачка використовувалася три рази, була отримана вибірка з $4000 \times 3 = 12000$ реалізацій накоплених та продетектованих РЛДП.

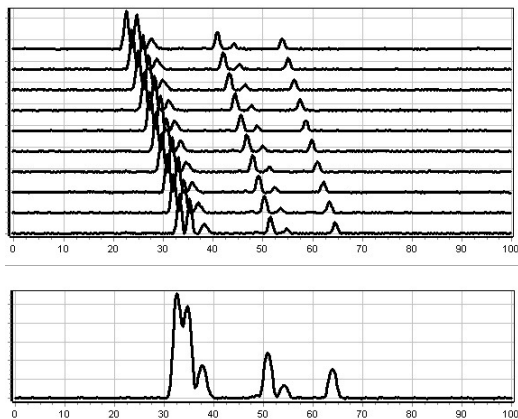


Рис. 1. Пачка непарних продетектованих РЛДП та накоплений РЛДП літака Ту-16

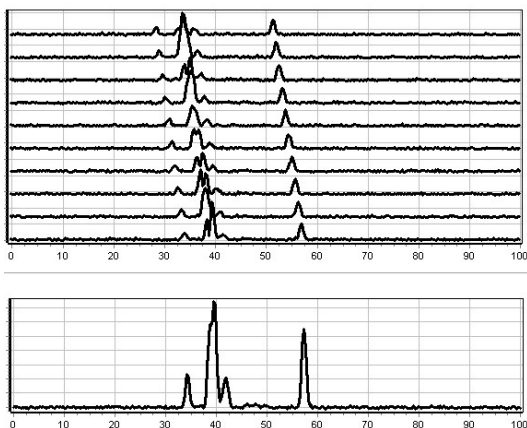


Рис. 2. Пачка непарних продетектованих РЛДП та накоплений РЛДП літака Ан-26

Навчання системи розпізнавання. Навчання системи розпізнавання при використанні кореляційного алгоритму зводиться до розрахунку набору еталонних РЛДП. Для визначення впливу ракурсу спостереження ПО навчання потрібно виконувати в визначених секторах. Одне з питань, що підлягає дослідженню – розмір ракурсних секторів. В роботі було досліджено сектори трьох розмірів – 60°, 30° та 10°. При використанні секторів розміром 60° необхідний діапазон кутів ракурсів 0°–180° перекривається 4-ма секторами. При використанні секторів розміром 30° – 7-ю секторами, а при використанні секторів розміром 10° – 19-ю секторами. Геометрія розбивки на ракурсні сектори наведена на рис. 3–5 відповідно для секторів розміром 60°, 30° та 10°. Використовувати сектори розміром менші за 10° не має сенсу, тому що визначення ракурсу спостереження здійснюється за рахунок виміру поточного курсу ПО відносно РЛС, а помилки його виміру на практиці досягають 10°. Крім того, на практиці при зменшенні розміру ракурсного сектору стає проблематичною отримання необхідної кількості РЛДП для здійснення навчання системи розпізнавання.

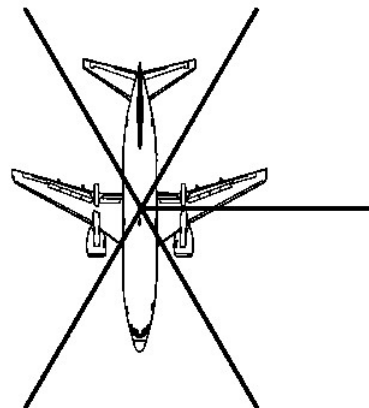


Рис. 3. Розбивка на ракурсні сектори розміром 60°

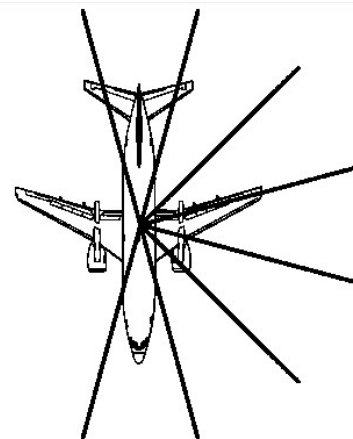


Рис. 4. Розбивка на ракурсні сектори розміром 30°

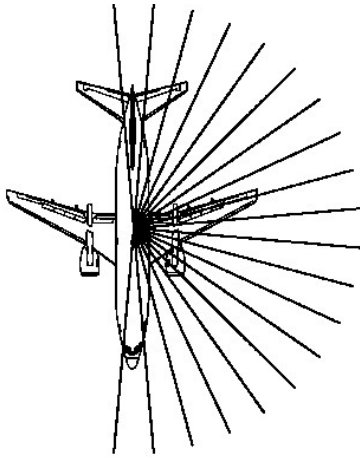


Рис. 5. Розбивка на ракурсні сектори розміром 10°

Для кожного ракурсного сектору розраховувалося 12 еталонних РЛДП. Для їх розрахунку використовувався емпіричний ітераційний кореляційний алгоритм [5].

При моделюванні було прийнято, що ракурс 0° відповідає польоту ПО від РЛС, ракурс 180° відповідає польоту ПО на РЛС, ракурс 90° відповідає спостереженню ПО під бортовим ракурсом.

Приклади деяких розрахованих еталонних РЛДП наведено на рис. 6–7. На рисунках представлені еталонні РЛДП літака В-1В для секторів розміром 10°.

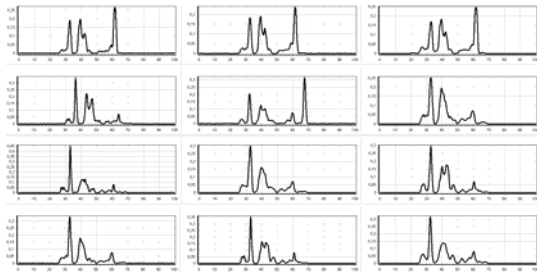


Рис. 6. Еталонні РЛДП літака В-1В для сектору №18 (170°)

На рис. 6 та 7 добре помітно, що при спостереженні літака під бортовим ракурсом відбувається значне скорочення протяжності РЛДП по відношенню до РЛДП які отримуються при польоті літака на РЛС.

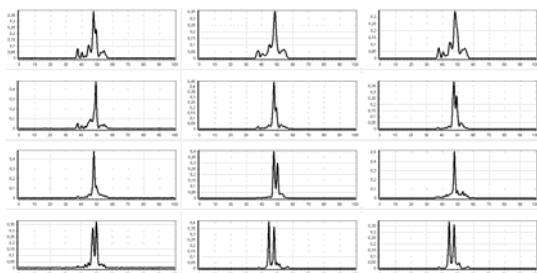


Рис. 7. Еталонні РЛДП літака В-1В для сектору №10 (90°)

На рис. 7 еталонні РЛДП розраховані для сектору №18 (кут ракурсу для центру сектору – 170°), тобто відповідають польоту на РЛС під кутом 10°. На рис. 8 наведені РЛДП для сектору №10 (кут ракурсу для центру сектору – 90°), тобто відповідають спостереженню літака під бортовим ракурсом.

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 [14]. Елементами матриці є умовні вірогідності прийняття рішення о приналежності об'єкту і-го типу до типу k P(k|i). Матриця є квадратною розмірністю M×M, де M – кількість типів об'єктів, 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 18 типів ПО матриця має розмірність 18×18 та складається з 324 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) R_{пр}. Вона розраховується як середнє арифметичне діагональних елементів матриці розпізнавання

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

Перевагою показника R_{пр} 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 R_{пр} з вірогідністю вгадування R_в. При рівновірогідній появі об'єктів розпізнавання вірогідність вгадування R_в=1/M. Тому при розпізнаванні тільки двох об'єктів R_в=1/2=0.5. При R_{пр}=0.95, вірогідність збільшується в 1.9 рази. При розпізнаванні десяти об'єктів R_в=1/10=0.1. При

$P_{pr}=0.8$ вірогідність збільшується в 8 разів. Тобто друга система значно краще за першу. В нашому випадку розпізнавання 18 типів ПО $P_v=1/18=0.056$. В цьому випадку навидь $P_{pr}=0.5$ слід вважати хорошим показником.

Вільним від недоліків, що притаманні вірогідності розпізнавання є кількість інформації розпізнавання I , що розраховується за виразом [15]:

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

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

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 однаковому 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 [16], 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 18 типів ПО максимально можливе значення $J=18$. 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 18. Мінімально можливе значення $J = 2^0 = 1$.

Ще одним показником якості системи розпізнавання є матриця умовних апостеріорних вірогідностей приналежності об'єкту до типу k , якщо система прийняла рішення, що об'єкт належить до типу i – $P_a(k|i)$. Матриця умовних апостеріорних вірогідностей розраховується з матриці розпізнавання шляхом нормування її елементів таким чином, щоб сума значень стовпчиків дорівнювала одиниці.

Кореляційний алгоритм розпізнавання. Кореляційний алгоритм розпізнавання ПО полягає в розрахунку коефіцієнтів кореляції (коваріації) між прийнятим РЛДП \tilde{Y} та набором еталонних РЛДП для визначеного ракурсного сектору \tilde{X}^{ij} , $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, L}$, де M – кількість типів ПО, що розпізнаються; L – кількість еталонних РЛДП, що розраховуються для кожного ракурсного сектору і одного типу ПО. В нашому випадку $M=18$, $L=12$. Рішення про тип ПО приймається на користь типу ПО, для еталону якого розраховане значення коефіцієнту кореляції (коваріації) приймає максимальне значення.

Так як при прийомі РЛДП його точне положення у вікні спостереження невідоме, при розрахунку значення коефіцієнту кореляції (коваріації) з еталоном необхідно перевірити всі гіпотези про взаємне положення прийнятого РЛДП на еталонного. В якості значення коефіцієнту кореляції обирається його максимальне значення

$$r_{ij} = \max_n \sum_{k=1}^K y_k x_{k+n}^{ij},$$

де K – кількість дискретів, якими представлені прийнятий РЛДП, та еталонні РЛДП;

n – поточний зсув взаємного положення прийнятого РЛДП та еталонного, $-N/2 \leq n \leq N/2$, N – діапазон можливих зсувів між прийнятим РЛДП та еталонними.

Для виключення впливу амплітуди РЛДП на прийняття рішень всі еталонні РЛДП повинні бути пронормовані таким чином, щоб виконувалося рівняння

$$\sum_{k=1}^K x_k^{ij} x_k^{ij} = 1.$$

Результати досліджень впливу ракурсу спостереження повітряних об'єктів на якість їх радіолокаційного розпізнавання. Для моделювання розпізнавання були отримані вибірки РЛДП розміром 12000 для кожного з 18 типів ПО для різних значень ракурсів спостереження в діапазоні 0° – 180° та для різних значень відношень сигнал-шум в діапазоні 10–30 дБ. Усього була отримана вибірка з $12000 \times 18 = 216000$ РЛДП. На етапі навчання, з вихідної вибірки було розраховано: для ракурсних секторів розміром 60° – $12 \times 4 = 48$ еталонних РЛДП, для секторів розміром 30° – $12 \times 7 = 84$ еталонних РЛДП і для секторів розміром 10° – $12 \times 19 = 228$ еталонних РЛДП. Результати моделювання розпізнавання наведено у вигляді графіків залежності вірогідності розпізнавання (рис. 8) та кількості інформації розпізнавання (рис. 9) від ракурсу спостереження та розміру ракурсних секторів для навчання.

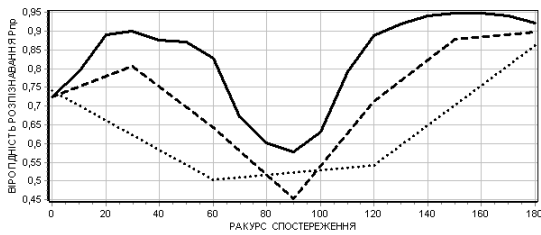


Рис. 8. Вірогідність розпізнавання 18 типів ПО. Суцільна лінія – для секторів розміром 10°, штрихова – для секторів розміром 30°, пунктирна – для секторів розміром 60°

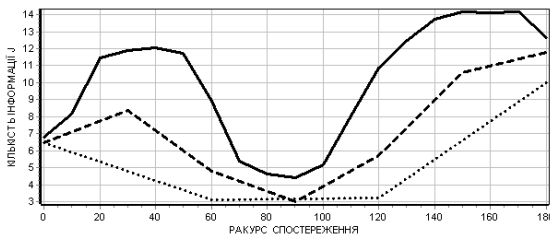


Рис. 9. Кількість інформації J розпізнавання 18 типів ПО. Суцільна лінія – для секторів розміром 10°, штрихова – для секторів розміром 30°, пунктирна – для секторів розміром 60°

Результати моделювання показують, що якість розпізнавання суттєво залежить від ракурсу спостереження та розміру ракурсних секторів для навчання системи. Як і очікувалося, зі зменшенням розміру ракурсного сектору при навчанні якість розпізнавання збільшується. Безумовно (усереднена) до ракурсу спостереження вірогідність розпізнавання $R_{пр} = 0,66$, кількість інформації розпізнавання $J = 4,3$ при використанні ракурсних секторів розміром 60°, $R_{пр} = 0,75$ і $J = 5,71$ при використанні ракурсних секторів розміром 30° та $R_{пр} = 0,84$ і $J = 8,24$ при використанні ракурсних секторів розміром 10°. Таким чином, при використанні ракурсних секторів розміром 30° кількість інформації розпізнавання збільшується на 33% по відношенню до випадку використання ракурсних секторів розміром 60°. При використанні ракурсних секторів розміром 10° кількість інформації розпізнавання збільшується на 44% по відношенню до випадку використання ракурсних секторів розміром 30° та на 92% по відношенню до випадку використання ракурсних секторів розміром 60°. Тому при подальших дослідженнях використовувалося моделювання тільки при використанні ракурсних секторів розміром 10°.

Як видно з рис. 8–9, якість розпізнавання, в залежності від ракурсу спостереження, змінюється у досить великих межах. Вірогідність розпізнавання змінюється від 0,58 до 0,95. Кількість інформації розпізнавання змінюється від 4,43 до 14,16. Як і очікувалося, найгірша якість розпізнавання забезпечується при спостереженні ПО під бортовим ракурсом.

Але і в цьому випадку вірогідність розпізнавання (0,58) більш ніж у 10 разів більша за вірогідність вгадування ($1/18 = 0,056$). Тому ствердження деяких фахівців про неможливість розпізнавання під бортовими ракурсами не є дійсними. Найбільша якість розпізнавання забезпечується при спостереженні ПО у передню напівсферу під кутом біля 30° (відповідає ракурсу 150°). В цьому випадку $R_{пр} = 0,95$, $J = 14,16$. При спостереженні ПО в задню напівсферу найбільша якість розпізнавання забезпечується при спостереженні ПО під тим же кутом 30° (відповідає ракурсу 30°). Це явище пояснюється тим фактом, що більша частина розсіювачів центрів знаходиться на фюзеляжі ПО. При спостереженні ПО уздовж лінії вісьової симетрії значна кількість центрів розсіювання затінена. При відхиленні вісі спостереження від вісі симетрії до 30°, значна кількість виходить з області затінення, а скорочення РЛДП ще незначне. При збільшенні відхилення осі спостереження від вісі симетрії проявляється ефект скорочення РЛДП, що приводить до погіршення якості розпізнавання.

Зі списку ПО найбільш якісне розпізнавання здійснювалося для моделі бомбардувальника В-52. Найгірше розпізнавалася модель крилатої ракети ALCM. На рис. 10 наведені графіки вірогідності розпізнавання цих двох ПО. Безумовно до ракурсу спостереження вірогідність розпізнавання складає 0,96 для ПО типу В-52, та 0,69 для ПО типу ALCM.

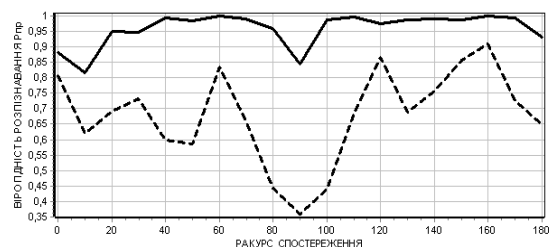


Рис. 10. Вірогідність розпізнавання моделі бомбардувальника В-52 (суцільна лінія) та моделі крилатої ракети ALCM (штрихова лінія)

Цей результат досить очікуваний. Розпізнавання великих ПО зі складною формою здійснюється краще ніж маленьких ПО з відносно простою формою. Як видно з графіку, якість розпізнавання моделі бомбардувальника В-52 при його спостереженні під бортовим ракурсом знижується незначно. Це пояснюється тим фактом, що на цьому літаку встановлено вісім двигунів, які розміщені на крилі. Тому при спостереженні ПО під бортовим ракурсом скорочення РЛДП є не таким значним, як для ПО інших типів. Цікавим є розподіл помилок розпізнавання для ПО зазначених типів. На рис. 11–12 наведені діаграми ймовірностей прийняття помилкових рішень при розпізнаванні моделі літака В-52 (рис. 11) та крилатої ракети ALCM (рис. 12).

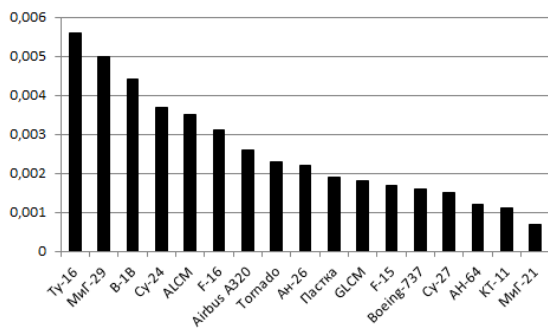


Рис. 11. Розподіл імовірностей прийняття помилкових рішень при розпізнаванні моделі бомбардувальника В-52

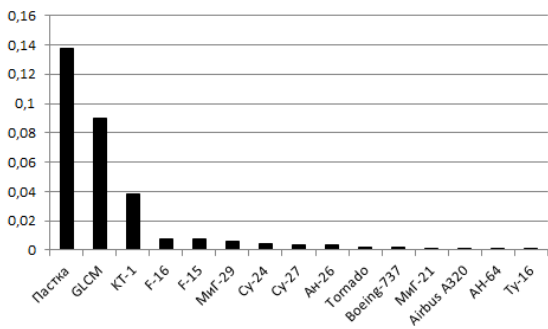


Рис. 12. Розподіл імовірностей прийняття помилкових рішень при розпізнаванні моделі крилатої ракети ALCM

При розпізнаванні моделі крилатої ракети розподіл прийняття помилкових рішень значно більш нерівномірний ніж при розпізнаванні моделі літака В-52. Основна доля помилкових рішень приймається на користь малорозмірних ПО (ракети-пастки, крилатої ракети GLCM та легкомоторного літака KT-1). Нагадаємо що модель ракети-пастки – це модель крилатої ракети ALCM, до якої добавлено два штучних відбивача для збільшення поверхні розсіювання. При розпізнаванні моделі бомбардувальника В-52 розподіл ймовірностей помилкових рішень більш рівномірний. Простежується тенденція того, що імовірність помилкових рішень на користь ПО більших розмірів більша, ніж користь малих.

Аналіз апостеріорних вірогідностей показує, що у випадку прийняття системою розпізнавання рішення «В-52» вірогідність того, що це дійсно літак В-52, дорівнює 0,996, тобто біля одиниці. Гіпотези про приналежність ПО до типів: Boeing-737, Airbus A320, F-16, МиГ-21, МиГ-29, ALCM, GLCM, пастка повністю виключаються. При прийнятті рішення «ALCM» вірогідність того, що це дійсно ALCM, складає 0,69. При цьому не може бути виключена жодна з гіпотез про приналежність до інших типів ПО.

При виконанні моделювання ракурс спостереження цілі до цього часу визначався безпомилково. На практиці, для визначення ракурсу спостереження

потрібно вимірювати поточне значення курсу ПО. Вимір поточного курсу ПО радіолокаційними засобами виконується з помилками. Відповідно, це може приводити до появи помилок визначення ракурсного сектору спостереження. Вплив помилок виміру курсу буде тим більше, чим менше розмір ракурсних секторів навчання системи розпізнавання. Для дослідження ступеню впливу помилок виміру поточного курсу було виконане відповідне математичне моделювання. При моделюванні до істинного значення курсу додавалася помилка з датчика випадкових чисел розподілених по нормальному закону з нульовим середнім та середньоквадратичним відхиленням 2°. Результати моделювання наведено у вигляді графіків залежності вірогідності розпізнавання від ракурсу спостереження при відсутності та наявності помилок виміру поточного курсу ПО (рис. 13) та кількості інформації розпізнавання (рис. 14).

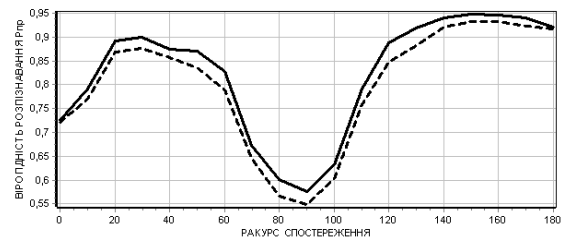


Рис. 13. Вірогідність розпізнавання при відсутності помилок виміру курсу (суцільна лінія) та при наявності (штрихова лінія)

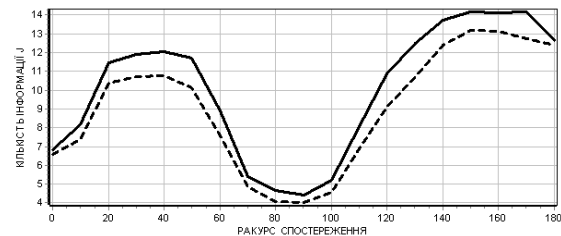


Рис. 14. Кількість інформації розпізнавання при відсутності помилок виміру курсу (суцільна лінія) та при наявності (штрихова лінія)

Моделювання показало, що при наявності помилок виміру курсу, при розпізнавання 18 типів ПО безумовна вірогідність розпізнавання зменшилася на 13%, кількість інформації розпізнавання на 10%. Таке зменшення можна вважати припустимим.

Висновки

Виконані дослідження показали, що якість розпізнавання повітряних об'єктів по їх РЛДП суттєво залежить від ракурсу спостереження. Для умов моделювання вірогідність розпізнавання змінюється на 40%, а кількість інформації розпізнавання на 68%. Найгірші значення показників якості розпізнавання відповідають спостереженню об'єктів під бортовими ракурсами, але і для цього випадку, вірогідність

розпізнавання на порядок перевищує вірогідність вгадування. Якість розпізнавання більша при спостереженні ПО у передню напівсферу чим у задню. Найбільша якість розпізнавання забезпечується при відхиленні лінії візування приблизно на 30° від лінії вісьової симетрії ПО. Тобто, можна зробити висновок, що система розпізнавання ПО за їх дальнісними портретами працездатна для будь якого ракурсу спостереження.

Помилки виміру поточного курсу ПО також впливають на якість розпізнавання, але їх вплив не досить суттєвий. Для умов моделювання вірогід-

ність розпізнавання зменшилася на 13%, кількість інформації розпізнавання на 10%.

Для підвищення якості розпізнавання можна рекомендувати наступні шляхи:

- удосконалення методів формування еталонних РЛДП та визначення оптимальної їх кількості;
- використання додаткових ознак розпізнавання, наприклад траєкторних та модуляційних;
- прийняття рішень не по одній реалізації РЛДП а декількох;
- визначення умов для відмови на прийняття рішення.

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.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy. – Boston-London: Artech House, 2002. – 294 p.
6. 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.
7. 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.
8. Classification of Aerial Targets by Using Bicoherence-Based Features Extracted from Micro-Doppler Contributions / P. Molchanov, A. Totsky, K. Egiazarian, S. Leshchenko, M. Pilar Jarabo-Amores // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – April 2014. – Vol. 50, No. 2. – P. 1455-1467.
9. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, Y.D. Shirman. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.
10. Лещенко С.П. Информативность и достоверность распознавания воздушных целей по их дальностным портретам / С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХВУ. – 2001. – № 7(37). – С. 69-72.
11. Лещенко С.П. Возможности измерения скорости в обзорных РЛС с широкополосными сигналами / С.П. Лещенко // Збірник наукових праць ХВУ. – 2002. – № 2(40). – С. 78-80.
12. Ковтунов А.Л. Методы вимірювання координат повітряних цілей в оглядових РЛС з використанням надширококуглових радіолокаційних сигналів / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, Д.Ю. Свистунов // Системи обробки інформації. – 2012. – № 7(105). – С. 91-94.
13. 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.
14. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Лещенко, Г.Д. Братченко, В.М. Орленко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 11. – С. 3-63.
15. Лещенко С.П. Информационный показатель качества систем радиолокационного распознавания / С.П. Лещенко // Зарубежная радиоэлектроника. – 1996. – № 11. – С. 64-66.
16. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования / И.В. Кузьмин, В.А. Кедрус. – 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 vozdushnykh 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. Hudson, S. and Psaltis, D. (1993), Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles, *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems*, Vol. 29, No. 3, pp. 741-748.

7. 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.
8. Molchanov, P., Totsky, A., Egiazarian, K., Leshchenko, S. and Pilar Jarabo-Amores, M. (2014), Classification of Aerial Targets by Using Bicoherence-Based Features Extracted from Micro-Doppler Contributions, *IEEE Transaction on aerospace and electronic systems*, Vol. 50, No. 2, pp. 1455-1467.
9. 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.
10. Leshchenko, S.P. (2001), "Informativnost i dostovernost raspoznavaniya vozdushnykh tseley po ikh dalnostnym portretam" [Informative and reliable recognition of air targets range profiles], *Collection of scientific papers KhMU*, No. 7(37), pp. 69-72.
11. Leshchenko, S.P. (2002), "Vozmozhnosti izmereniya skorosti v obzornykh RLS s shirokopolosnymi signalami" [Speed measurement capabilities in surveillance radars with wideband signals], *Collection of scientific papers KhMU*, No. 2(40), pp. 78-80.
12. Kovtunov, A.L., Leshchenko, S.P. and Svystunov, D.Iu. (2012), "Metody vymiriuvannya koordynat povitrianykh tsiley v ohliadovykh RLS z vykorystanniam nadshyrokosmuhovykh radiolokatsiinykh syhnaliv" [Methods of air targets' coordinate measuring in surveillance radars using superbroadband signals], *Information Processing Systems*, No. 7(105), pp. 91-94.
13. Liao, K., Si, J., Zhu, F. and He, X. (2018), Radar HRRP Target Recognition Based on Concatenated Deep Neural Networks, *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 29211-29218.
14. 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 radio electronics*, No. 11, pp. 3-63.
15. Leshchenko, S.P. (1996), "Informatsionnyy pokazatel kachestva sistem radiolokatsionnogo raspoznavaniya" [Information indicator of the quality of radar recognition systems], *Foreign radio electronics*, No. 11, pp. 64-66.
16. 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 19.09.2018
Схвалена до друку 22.10.2018

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 Researcher of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3006-2822>

ВЛИЯНИЕ РАКУРСА НАБЛЮДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НА КАЧЕСТВО ИХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ

С.П. Лещенко

Приводятся результаты исследования влияния ракурса наблюдения воздушных объектов на качество их радиолокационного распознавания. В качестве признака распознавания рассматривается радиолокационный дальностный портрет, который получается при использовании зондирующих сигналов с высокой разрешающей способностью по дальности. Исследования выполнены методом математического моделирования. Исследования распознавания проводились для 18 типов воздушных объектов. Получены числовые значения показателей качества распознавания типа воздушного объекта.

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

INFLUENCE OF THE ANGLE OF OBSERVATION OF AIR OBJECTS ON THE QUALITY OF THEIR RADAR RECOGNITION

S. Leshchenko

The results of the study of the influence of the angle of observation of air objects on the quality of their radar recognition are given. As a sign of recognition is considered a range profile, which is obtained when using probing signals with high resolution in range (high resolution radar HRR). Studies performed by the method of mathematical modeling. Recognition studies were carried out for 18 types of air objects as applied to a radar using signals with a spectrum width of 200 MHz (range resolution of 0.75 m) at a wavelength of 10 cm. The obtained numerical values of indicators of quality recognition of the type of air object. The recognition quality was estimated by the values of the recognition probability and the amount of recognition information. The preferred size of view sectors for the presentation of reference data has been determined. For sector sizes of 60°, 30° and 10°, the best recognition quality is observed for angle sectors of size 10°. It is shown that the best quality of recognition is provided by observing a target at an angle of about 30 degrees with respect to the line of the axis of symmetry of an air object. The worst values of the recognition quality indicators are observed when accompanying air objects under the side angles. However, in this case, the system remains operable, since the probability of recognition is an order of magnitude higher than the probability of guessing. The impact of errors in measuring the rate of an air object on the quality of recognition is estimated. It is shown that course measurement errors, distributed according to the Gauss law with a standard deviation of 2° and zero mean, lead to a 13% decrease in the probability of recognition, and the amount of recognition information decreases by 10%.

Keywords: Radar recognition of air objects, recognition quality, range profile, mathematical modeling.