

С.П. Лещенко

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

## ВПЛИВ ПОМИЛОК ВИМІРУ ШВИДКОСТІ ТА РАКУРСУ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ЯКІСТЬ ЇХ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДАЛЬНІСНИХ ПОРТРЕТІВ

*Наводяться результати дослідження впливу помилок виміру швидкості та ракурсу повітряних об'єктів на якість їх радіолокаційного розпізнавання. В якості ознаки розпізнавання розглядається радіолокаційний дальнісний портрет, що отримується при використанні зондуючих сигналів з високою розрізнявальною спроможністю по дальності. Помилки виміру швидкості та ракурсу впливають на результат некогерентного накопичення окремих дальнісних портретів, а відповідно і на якість розпізнавання. Дослідження виконані методом математичного моделювання. Дослідження розпізнавання виконувалися для 13 типів повітряних об'єктів. Отримані чисельні значення показників якості розпізнавання типу повітряного об'єкту. Показано, що наявність помилок виміру швидкості та ракурсу може приводити до енергетичних втрат до 5 дБ та зменшення вірогідності розпізнавання на 30%.*

**Ключові слова:** радіолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів, якість розпізнавання, радіолокаційний дальнісний портрет, математичне моделювання, помилки виміру, некогерентне накопичення.

### 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 англійській літературі HRRP - “high resolution range profile”) отримується при використанні ширококутових радіолокаційних сигналів, що забезпечують розрізнення окремих елементів плануру ПО за дальністю. Ширина спектру сигналу повинна бути не менш 50 МГц. Безпосереднє прийняття рішень може бути реалізовано за допомогою кореляційних [6–7] або нейрокомп'ютерних алгоритмів [8–9], або алгоритмів, що пов'язані зі специфічним перетворенням РЛДП [10–11; 16–19], або алгоритмів, що використовують оцінки щільності розподілу амплітуд [12]. 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 те, що можливість розпізнавання досліджувалися при отриманні поодинокого РЛДП. Але, на практиці, енергія по-

одинокого РЛДП мала і відповідно він має мале відношення сигнал – шум. Для збільшення відношення сигнал – шум та дальності розпізнавання, необхідно здійснювати накопичення відбитих сигналів, як це робиться при виявленні цілей. Процедура накопичення РЛДП виявляється дещо складнішою за накопичення вузькосмугових луна-сигналів, що використовуються для виявлення цілей. Наприклад, при ширині діаграми спрямованості антени  $1,8^\circ$  та швидкості її обертання 6 об/хв., час опромінення цілі складає 0,05 сек. Це максимальний час накопичення луна-сигналів. При типовій (не максимально можливій) швидкості польоту цілі 200 м/с, за час накопичення цілі пролетить відстань біля 10 м. При використанні вузькосмугових сигналів з розрізнявальною спроможністю декілька сотень метрів, зсувом у 10 м можна знехтувати, тому що він значно менший за розмір розрізнявальної спроможності по дальності. При використанні ширококутових сигналів, наприклад, з шириною спектру 200 МГц та розрізнявальною здатністю по дальності 0,75 м, за час накопичення цілі пролітає відстань у 13 елементів розрізнення. Таким зсувом нехтувати неможливо.

В цьому випадку, для накопичення РЛДП, необхідно компенсувати зсув цілі за час накопичення. Для розрахунку зсуву окремих РЛДП в паці виникає потреба в оцінці радіальної (уздовж лінії визначення) складової швидкості цілі. Помилки оцінювання радіальної швидкості будуть впливати на якість радіолокаційного розпізнавання. В більшості оглядових РЛС, безпосередній вимір радіальної

швидкості неможливий. Радіальну складову швидкості польоту ПО в оглядовій РЛС можна оцінити шляхом кореляційної обробки окремих (парціальних) РЛДП пачки [13]. Недоліком зазначеного методу є його велика чутливість до відношення сигнал/шум та флуктуації форми окремих РЛДП. Джерелом флуктуацій форми РЛДП є так звана “пропелерна” або “турбінна” модуляція. Тому вимір радіальної швидкості від таких цілей як вертоліт або гвинтовий літак з декількома двигунами здійснюється з великими помилками.

Радіальну складову можна розрахувати за результатами оцінки поточних значень швидкості та ракурсу цілі при траєкторній обробці. В цьому випадку наявність флуктуацій форми РЛДП не впливає на результат розрахунків. Дослідження впливу помилок оцінювання швидкості та ракурсу цілей на якість їх радіолокаційного розпізнавання є змістом представленої роботи. Так як отримати аналітичні залежності якості розпізнавання від наявності помилок оцінювання швидкості та ракурсу цілей не є можливим, основним методом дослідження був метод математичного моделювання.

### Виклад основного матеріалу

**Стислий огляд математичної моделі розрахунку відбитих радіолокаційних сигналів.** Дослідження виконувалося методом математичного моделювання. Для розрахунку РЛДП використовувалася математична модель “BSS” [5; 14], 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. Всього були використані математичні моделі повітряних об'єктів 13 типів: важкі реактивні бомбардувальники (B-52, B-1B, Ту-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).

Моделювалася робота РЛС з наступними параметрами: довжина хвилі – 0,1 м, частота повторення – 1 кГц, тип сигналу – лінійно-частотно-модульований з шириною спектру 200 МГц.

Такий сигнал забезпечує розрізняльну спроможність по дальності 0,75 му, що значно менше геометричних розмірів всіх ПО. Довжина строби спостереження складала 100 м. Частота дискретизації дорівнювала 600 МГц, що гарантовано забезпечувало виконання вимог теореми відліків.

**Вплив руху цілі на ефективність некогерентного накопичення та форму РЛДП.** Вплив руху

цілі на ефективність некогерентного накопичення та форму РЛДП, що накоплено, наведено на рис. 1.

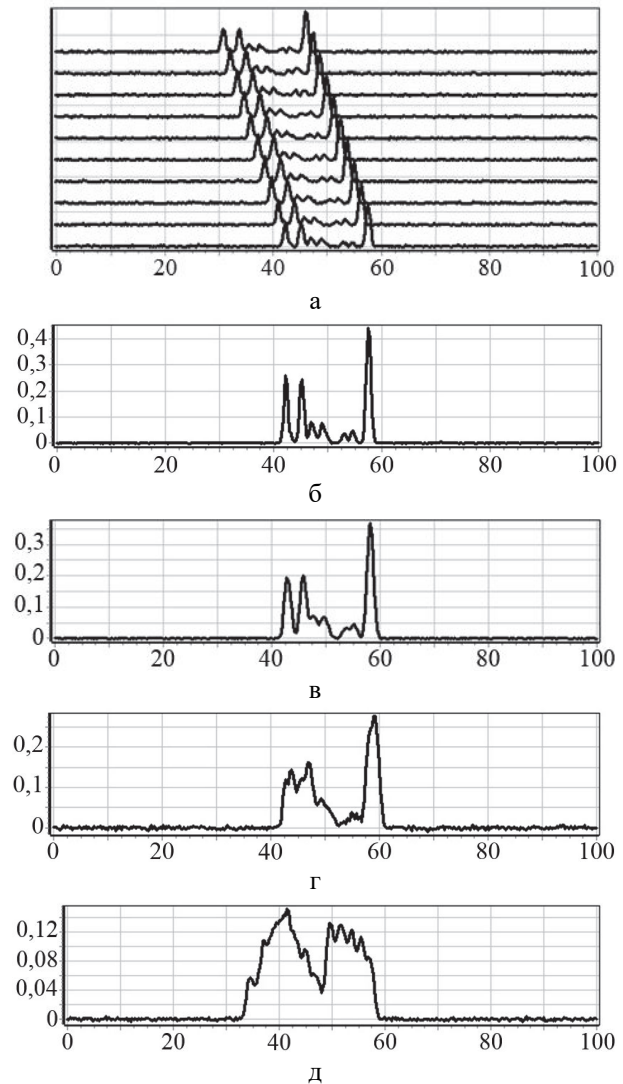


Рис. 1. Некогерентне накопичення РЛДП моделі літака Tornado

На рис. 1, а наведено пачку РЛДП моделі літака Tornado, що виконує політ в напрямку на РЛС зі швидкістю 900 км/г.

На рис. 1, б наведено результат накопичення окремих (парціальних) РЛДП в умовах відсутності помилки виміру радіальної швидкості цілі і точному вирівнянні положення парціальних РЛДП.

На рис. 1, в наведено результат накопичення в умовах, коли оцінка радіальної швидкості відрізняється від істинного значення на 100 км/г. Помилка виміру радіальної швидкості при отриманні РЛДП, що показано на рис. 1, г, дорівнювала 200 км/г.

При отриманні РЛДП, що наведено на рис. 1, д, зсувом парціальних РЛДП взагалі було знехтуване.

Наведені дані показують, що наявність помилок виміру радіальної швидкості приводить до спотворення форми накопиченого РЛДП. Незалежно від знаку помилки, спостерігається розширення піків РЛДП, що еквівалентно погіршенню розрізня-

вальної спроможності по дальності або звуженні спектру сигналу. Числа на шкалі ординат графіків показують, що при збільшенні помилок виміру радіальної швидкості зменшується максимальна амплітуда накопиченого РЛДП. Тобто, наявність помилок виміру радіальної швидкості погіршує якість некогерентного накопичення та зменшує відношення сигнал-шум.

В більшості оглядових РЛС безпосередній вимір радіальної швидкості цілей неможливий, але на етапі вторинної (траєкторної) обробки радіолокаційних даних визначаються оцінки значень швидкості  $V$ , та напрямку польоту (курсу) цілі  $\theta$ . Це дозволяє оцінити поточний ракурс спостереження цілі

$$\varphi = \beta - \theta,$$

де  $\beta$  – поточний азимут спостереження цілі.

Радіальна складова швидкості цілі розраховується, як проекція швидкості на лінію візування

$$V_r = V \cos \varphi. \quad (1)$$

Значення швидкості та ракурсу РЛС визначає з помилками. Якщо помилка виміру швидкості  $\delta_v$ , а помилка виміру ракурсу  $\delta_\varphi$ , то згідно (1) помилка виміру радіальної швидкості буде визначатися

$$\delta_{vr} = |V \cos \varphi - (V + \delta_v) \cos(\varphi + \delta_\varphi)|. \quad (2)$$

Якщо вимір ракурсу спостереження цілі робиться без помилок, тобто  $\delta_\varphi = 0$ , вираз (2) приймає вигляд

$$\delta_{vr} = |\delta_v \cos(\varphi)|. \quad (3)$$

Згідно (3) помилка виміру радіальної швидкості залежить від ракурсу спостереження цілі.

На рис. 2 наведено графік цієї залежності для випадку  $\delta_v = 20$  км/г.

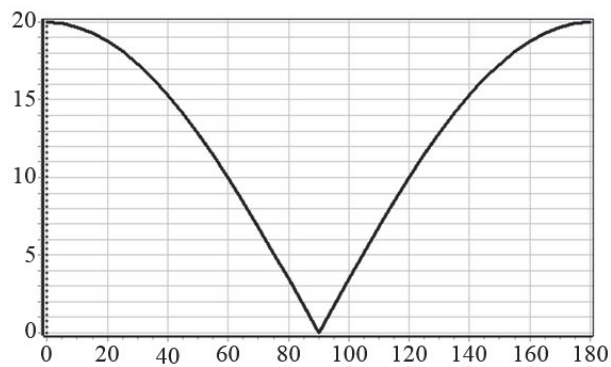


Рис. 2. Залежність помилки виміру радіальної швидкості від ракурсу спостереження при  $\delta_v = 20$  км/г,  $\delta_\varphi = 0$ .

Таким чином, якщо помилка виміру радіальної швидкості обумовлена тільки помилкою виміру значення повної швидкості цілі, максимальне її значення відповідає польоту уздовж лінії візування, і дорівнює нулю при польоті поперек лінії візування.

Якщо  $\delta_v = 0$ , то вираз (2) приймає вигляд

$$\delta_{vr} = |V \cos \varphi - V \cos(\varphi + \delta_\varphi)|. \quad (4)$$

Враховуючи, що в загальному випадку значення  $\delta_\varphi$  є малим, можна прийняти що  $\cos(\delta_\varphi) \approx 1$ .

Тоді вираз (4) можна записати у вигляді

$$\delta_{vr} \approx |V \sin(\varphi) \sin(\delta_\varphi)|. \quad (5)$$

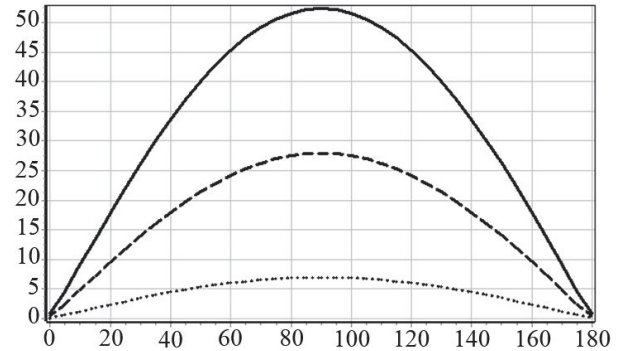


Рис. 3. Залежність помилки виміру радіальної швидкості від ракурсу спостереження при  $\delta_v = 0$ ,  $\delta_\varphi = 2$  для швидкості цілі 200 км/г (пунктирна лінія), 800 км/г (штрихова лінія), 1500 км/г (суцільна лінія)

Згідно (5) помилка виміру радіальної швидкості залежить як від ракурсу спостереження цілі так і від абсолютного значення швидкості її польоту. На рис. 3 наведено графік цієї залежності для випадку  $\delta_\varphi = 0$ , та швидкостей польоту цілі 200 км/г, 800 км/г, 1500 км/г.

Таким чином, якщо помилка виміру радіальної швидкості обумовлена тільки помилкою виміру значення ракурсу цілі, максимальне її значення відповідає польоту поперек лінії візування і суттєво залежить від швидкості польоту. При польоті уздовж лінії візування вона дорівнює нулю.

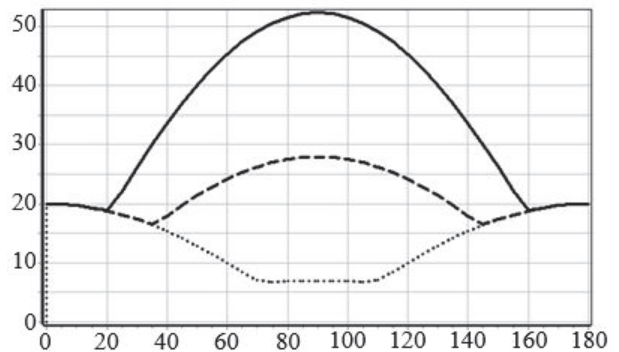


Рис. 4. Залежність СКО виміру радіальної швидкості від ракурсу спостереження при  $\sigma_v = 20$  км/г,  $\sigma_\varphi = 2^\circ$  для швидкості цілі 200 км/г (пунктирна лінія), 800 км/г (штрихова лінія), 1500 км/г (суцільна лінія)

Для визначення середньоквадратичного значення помилки виміру радіальної швидкості  $\sigma_{vr}$  від

середньоквадратичних помилок виміру швидкості та ракурсу  $\sigma_v$ ,  $\sigma_\varphi$  необхідно виконати усереднення даних по формулі (2).

Графік отриманої залежності  $\sigma_{vr}$  від ракурсу спостереження та швидкості цілі при  $\sigma_v = 20$  км/г,  $\sigma_\varphi = 2^\circ$  наведено на рис. 4.

**Моделювання радіолокаційного розпізнавання в умовах наявності помилок виміру радіальної швидкості.** Вплив помилок виміру радіальної швидкості ПО на якість їх розпізнавання встановити в аналітичний спосіб неможливо. Єдиним шляхом вирішення цього питання є моделювання радіолокаційного розпізнавання. Математичне 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  $0^\circ \dots 180^\circ$ , а не  $0^\circ \dots 360^\circ$ .

За допомогою математичної моделі “BSS” були отримані по 7600 реалізації пачок радіолокаційних РЛДП кожного типу ПО для навчальної і контрольної вибірок окремо. Усього розраховано 197600 пачок. Кожна пачка вміщувала 50 окремих РЛДП. При частоті повторення 1 кГц 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 Ту-16, B-52, 450 км/г для літака Ан-26, 250 км/ч для вертольоту АН-64.

Наявність руху цілей приводить до зміщення окремих РЛДП в межах однієї пачки (виключаючи випадок спостереження ПО під бортовим ракурсом).

Усього було розраховано  $197600 \times 20 = 3952000$  РЛДП. Кожен РЛДП представлено у комплексному вигляді у двох квадратурах. Крок розвороту ПО за ракурсом між окремими пачками дорівнював  $190^\circ / 7600 = 0,025^\circ$ . 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  $2^\circ$  для куту тангажу.

З отриманою вибіркою РЛДП виконана обробка, що зазвичай 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 наявні-

стю 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 обиралося випадково з рівномірними розподілом в діапазоні 3...27 дБ на один РЛДП пачки. Детектування зводилося до розрахунку модулю комплексних відліків РЛДП.

Некогерентне накопичення здійснювалося з компенсацією зміщення окремих РЛДП відносно один одного. Необхідне для цього значення радіальної швидкості ПО розраховувалося згідно виразу (1).

Шляхом моделювання здійснене оцінювання величини енергетичних втрат при некогерентному накопиченні  $\Delta S_{v,\varphi}$ , обумовлене помилками виміру швидкості та ракурсу ПО. Енергетичні втрати оцінювалися як різниця між відношенням сигнал/шум при накопиченні в умовах відсутності помилок вимірів та відношенням сигнал/шум при їх наявності:

$$\Delta S_{v,\varphi} = S_{0,0} - S_{v,\varphi} \quad (6)$$

Індекси у виразі (6) характеризують величини помилок. Так, запис  $S_{20,2}$  визначає відношення сигнал-шум накопиченого РЛДП при СКВ виміру швидкості  $\sigma_v = 20$  км/г, та СКВ виміру ракурсу  $\sigma_\varphi = 2^\circ$ . Результати моделювання наведено на рис. 5.

Як видно з наведеної діаграми, енергетичні втрати при некогерентному накопиченні можуть досягати помітної величини – до 5,5 дБ. Помилки виміру швидкості ПО вносять більший вклад ніж помилки виміру ракурсу. Для притаманних оглядовим РЛС значень СКО виміру швидкості  $\sigma_v = 20$  км/г та СКО виміру ракурсу  $\sigma_\varphi = 2^\circ$  енергетичні втрати складають 3 дБ.

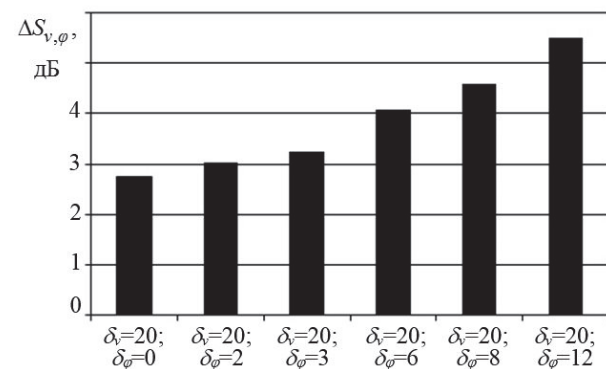


Рис. 5. Залежність енергетичних втрат при некогерентному накопиченні від СКО виміру радіальної швидкості та ракурсу ПО

Цікаво, що навіть при відсутності помилок виміру швидкості та ракурсу ефективність некогерен-



тного накопичення була різною для ПО різних типів. Так, найбільше відношення сигнал-шум після накопичення спостерігалось для літака типу Tornado. Відношення сигнал-шум для вертольоту Ан-64 було в середньому менше на 3,6 дБ. Для літака Ан-26 воно було менше на 1,3 дБ, для бомбардувальника В-52 на 0,7 дБ. Для всіх інших типів ПО зменшення відношення сигнал, шум не виходило за межі 0,1...0,4 дБ. Вертоліт та літак Ан-26 створюють “пропелерну” модуляцію луна-сигналів. Літак В-52 має вісім турбореактивних двигунів, що створюють найбільшу за всі інші типи турбореактивних літаків “турбінну” модуляцію. З цього можна зробити висновок, що наявність “пропелерної” або “турбінної” модуляція приводить до зниження ефективності некогерентного накопичення РЛДП.

При моделюванні безпосередньо розпізнавання використовувався кореляційний алгоритм прийняття рішень [5; 7]. Кореляційний алгоритм розпізнавання ПО полягає в розрахунку коефіцієнтів кореляції (коваріації)  $r_{ij}$  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. Рішення про тип ПО приймається на користь типу ПО для еталону якого розраховане значення коефіцієнту кореляції (коваріації) приймає максимальне значення.

Навчання системи розпізнавання при використанні кореляційного алгоритму зводиться до розрахунку набору еталонних РЛДП. Набори еталонних портретів розраховувалися для окремих ракурсних секторів розміром по  $10^\circ$ , що забезпечують найбільшу якість розпізнавання [7].

Всього використовувалося 19 ракурсних секторів. В кожному ракурсному секторі, для кожного типу ПО розраховувалося по 4 еталонних РЛДП, тобто всього було розраховано  $19 \times 13 \times 4 = 988$  еталонних РЛДП.

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

Найбільш повно якість системи розпізнавання характеризує матриця розпізнавання [7; 15]. Елементами матриці є умовні вірогідності прийняття рішення о приналежності об'єкту  $i$ -того типу до типу  $k$   $P(k|i)$ . Матриця є квадратною розмірністю  $M \times M$ , де  $M$  – кількість типів об'єктів, що розпізнаються.

Кожен рядок матриці характеризує якість розпізнавання конкретного ПО. Столпчики матриці відповідають прийнятим рішенням. На головній діагоналі матриці знаходяться значення умовних вірогідностей прийняття правильних рішень. Всі інші елементи матриці є значеннями умовних віро-

гідностей прийняття помилкових рішень. В зв'язку зі складнощами порівняння показника якості у вигляді матриці, в роботі оцінювалися два скалярних показника – 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

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

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.

Кількість інформації розпізнавання у лінійній шкалі розраховується за виразом

$$J = 2^I,$$

де

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

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 13 типів ПО максимально можливе значення  $J = 13$ . Це значення буде досягнуто при достовірному розпізнаванні усіх типів ПО. Мінімально можливе значення  $J = 2^0 = 1$ .

При моделюванні розпізнавання відповідні помилки виміру швидкості та ракурсу вводилися як на етапі навчання системи так і на етапі контрольного розпізнавання. Результати моделювання розпізнавання наведені на діаграмах вірогідності розпізнавання (рис. 6) та кількості інформації розпізнавання (рис. 7).

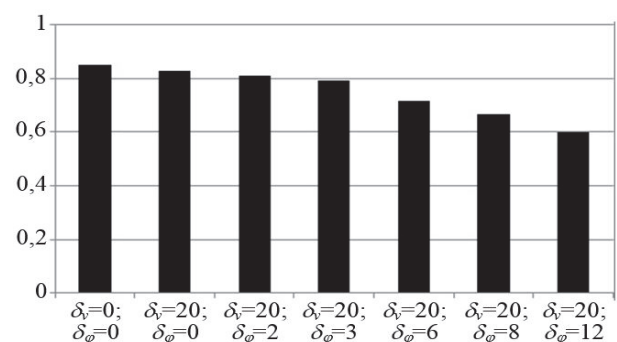


Рис. 6. Залежність вірогідності розпізнавання від СКО виміру радіальної швидкості та ракурсу ПО

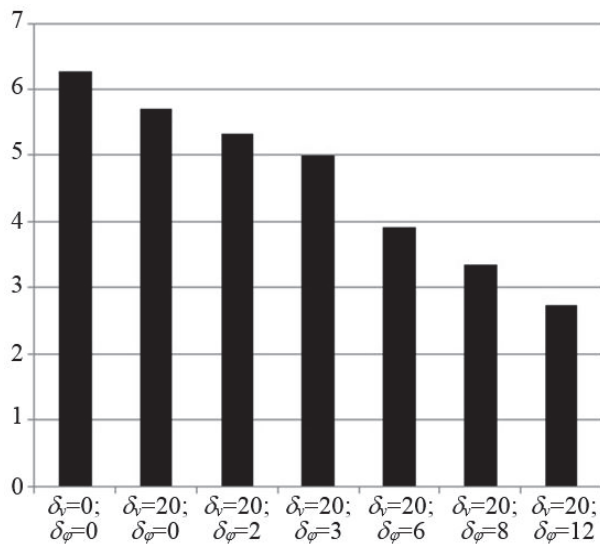


Рис. 7. Залежність кількості інформації розпізнавання від СКО виміру радіальної швидкості та ракурсу ПО

Наведені данні отримані шляхом усереднення за всі можливі ракурси спостереження ПО.

Результати моделювання показують, що помилки виміру швидкості та ракурсу цілі в оглядових РЛС при здійсненні некогерентного накопичення РЛДП можуть суттєво погіршити якість радіолокаційного розпізнавання. Так, вірогідність розпізнавання може знизитись на 30%, а кількість інформації розпізнавання взагалі більш ніж на 50%.

## Висновки

Виконані дослідження показали, що якість розпізнавання повітряних об'єктів по їх РЛДП суттєво залежить від якості некогерентного накопичення парціальних РЛДП яке, в свою чергу для оглядових РЛС залежить від помилок виміру швидкості та ракурсу ПО, що супроводжуються.

Наявність помилок виміру швидкості та ракурсу ПО приводить до зменшення відношення сигнал-шум до 5 дБ та спотворення форми РЛДП. Для умов моделювання вірогідність розпізнавання може погіршуватися на 30%, а кількість інформації розпізнавання на 50%.

Для значень СКВ виміру швидкості  $\sigma_v = 20$  км/г та СКВ виміру ракурсу  $\sigma_\varphi = 2^\circ$ , що притаманні більшості оглядових РЛС при супроводженні цілей, які не маневрують, зниження вірогідності розпізнавання складає 5%, а кількості інформації розпізнавання 15%, що ще можна вважати припустимим. Але на ділянках маневрування якість розпізнавання може бути значно гірше. Тому слід уникати визначати режим розпізнавання цілей на ділянках маневрування.

Для зменшення помилок виміру швидкості та ракурсу необхідно зменшувати помилки виміру дальності та азимуту ПО, а також зменшувати період огляду.

## Список літератури

1. О первых отечественных исследованиях по широкополосной радиолокации / Я.Д. Ширман, В.Б. Алмазов, В.Н. Голиков, В.И. Гомозов // 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. – № 4(8). – 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. Ширман Я.Д. Справочник. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теории / Я.Д. Ширман. – 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. Hudson S. Correlaton filters for aircraft identification from radar range profiles / S. Hudson, D. Psaltis // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1993. – № 3(29). – P. 741-748.
7. 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>.
8. Classification of radar target using synthetic neural network / I. Jouny, F. Garber, S. Ahalt // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 1993. – № 2(29). – P. 336-344.
9. Radar HRRP Target Recognition Based on Concatenated Deep Neural Networks / Kuo Liao, Jsnxiu Si, Fangqi Zhu, He. Xudong // IEEE Access. – 2018. – № 6. – P. 29211-29218.
10. Classification of Aerial Targets by Using Bicoherence-Based Features Extracted from Micro-Doppler Contributions / P. Molchanov, A. Totsky, K. Egiazarian, S. Leshchenko, M. Jarabo-Amores Pilar // IEEE Transaction on aerospace and electronic systems. – 2014. – № 2(50). – P. 1455-1467.
11. Васюта К.С. Развитие методов радиолокационного распознавания воздушных целей с применением рекуррентного анализа / К.С. Васюта // Системи обробки інформації. – 2013. – № 7(114). – С. 55-57.
12. 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.
13. Методика оцінки радіальної швидкості цілі при обробці виявленої пачки надширококуткового сигналу / А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закіров, Л.В. Польшина // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 1(10). – С. 71-74.

14. 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.
15. 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.
16. Филимонов А.Б. Методы формирования информативных признаков радиолокационных дальностных портретов воздушных целей / А.Б. Филимонов, Фам Фыонг Кыонг // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – № 4(17). – С. 273-281. <https://doi.org/10.17587/mau.17.273-281>.
17. Jiansheng F. Radar HRRP Recognition Based on Discriminant Information Analysis / F. Jiansheng, D. Xiaohong, Y. Wanlin // *Wseas Transactions on Information Science and Applications*. – 2011. – № 4(8). – P. 185-201.
18. Qiusheng L. Classification of aircraft targets with surveillance radars based on fuzzy fractal Features / L. Qiusheng, X. Weixin // *Progress In Electromagnetics Research*. – 2013. – № 29. – P. 65-77.
19. Филимонов А.Б. Динамическое распознавание воздушных целей по радиолокационным дальностным портретам / А.Б. Филимонов, Фам Фыонг Кыонг // Информационные технологии. – 2016. – № 6(22). – С. 423-430.

## 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*, No. 4(8), 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), Correlator filters for aircraft identification from radar range profiles, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, No. 3(29), pp. 741-748.
7. Leshchenko, S.P. (2018), “Vplyv rakursu sposterzhennya povitryanykh ob'yektiv na yakist' yikh radiolokatsionnoho rozpoznavannya” [Influence of aerial view of aerial objects on the quality of their radar recognition], *Science and Technology of the Air Force Ukraine*, No. 4(33), pp. 60-68. <https://doi.org/10.30748/nitps.2018.33.08>.
8. Jouny, I., Garber, F. and Ahalt, S. (1993), Classification of radar target using synthetic neural network, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, No. 2(29), pp. 336-344.
9. Kuo, Liao, Jsxiu, Si, Fangqi, Zhu, and Xudong, He (2018), Radar HRRP Target Recognition Based on Concatenated Deep Neural Networks, *IEEE Access*, No. 6, pp. 29211-29218.
10. 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*, No. 2(50), pp. 1455-1467.
11. Vasyuta, K.S. (2013), “Razvitiye metodov radiolokatsionnogo raspoznavaniya vozdushnykh tseley s primeneniem rekurrentnogo analiza” [Development of methods for radar recognition of air targets using recurrence analysis], *Information Processing Systems*, No. 7(114), pp. 55-57.
12. 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 Kharkiv Military University*, No. 7(37), pp. 69-72.
13. Kovtunov, A.L., Leshchenko, S.P., Zakirov, Z.Z. and Polandina, L.V. (2013), “Metodyka otsinky radial'noyi shvydkosti tsili pry obrobttsi vyyavlenoyi pachky nadshyrokosmuhovoho syhnalu” [The technique of estimating the radial velocity of the target in the processing of the detected packet of the broadband signal], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 10, pp. 71-74.
14. 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.
15. 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.
16. Filimonov, A.B. and Kyong, F.P. (2016), “Metody fopmipovaniya infopmativnykh ppiznakov padiolokatsionnykh dal'nostnykh portpetov vozdushnykh tseley” [Methods of forming informational indications of radar long-range portlets of air targets], *Mechatronics, Automation, Control*, No. 4(17), pp. 273-281. <https://doi.org/10.17587/mau.17.273-281>.
17. Jiansheng, F., Xiaohong, D. and Wanlin, Y. (2011), Radar HRRP Recognition Based on Discriminant Information Analysis, *Wseas Transactions on Information Science and Applications*, No. 4(8), pp. 185-201.
18. Qiusheng, L. and Weixin, X. (2013), Classification of aircraft targets with surveillance radars based on fuzzy fractal Features, *Progress in Electromagnetics Research*, No. 29, pp. 65-77.
19. Filimonov, A.B. and Kyong, F.P. (2016), “Dinamicheskoye paspoznavaniye vozdushnykh tseley po padiolokatsionnym dal'nostnym portpetam” [Dynamic Aerial Target Recognition by Radar Range Profiles], *Information Technology*, No. 6(22), pp. 423-430.

Надійшла до редколегії 02.10.2019

Схвалена до друку 19.11.2019

**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:****Serhii 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 ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И РАКУРСА ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ НА КАЧЕСТВО ИХ РАСПОЗНАВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАЛЬНОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ**

С.П. Лещенко

Приводятся результаты исследования влияния ошибок измерения скорости и ракурса 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. Ошибки измерения скорости и ракурса влияют на результат некогерентного накопления отдельных дальностных портретов, а соответственно и на качество распознавания. Исследования выполнены методом математического моделирования. Исследования распознавания проводились для 13 типов воздушных объектов. Получены числовые значения показателей качества распознавания типа воздушного объекта. Показано, что наличие ошибок измерения скорости и ракурса может приводить к энергетическим потерям до 5 дБ и снижению вероятности распознавания на 30%

**Ключевые слова:** Радиолокационное распознавание воздушных объектов, качество распознавания, радиолокационный дальностный портрет, математическое моделирование ошибки измерения, некогерентное накопление.

**THE RECOGNITION QUALITY EFFECT OF SPEED AND ASPECT ANGLE MEASUREMENT ERRORS USING HIGH RANGE RESOLUTION PROFILES FOR AERIAL OBJECTS**

S. Leshchenko

The effect of speed and aspect angle measurement errors are considered for aerial objects recognition. A high range resolution profile (HRRP) is used as recognition sign. The high resolution range profile can be obtained using probing signals with high signal bandwidth, more than 50 MHz. In surveillance radars speed and aspect angle measurement errors affect the incoherent accumulation of separate high range resolution profiles, and the recognition quality, accordingly. This is due to the fact that range resolution value is less more the distance covered by aerial object during accumulation of reflected pulse packet. In such case in incoherent accumulation it is necessary the matching separate range profiles according to distance using radial speed estimate. The mathematical simulation method is used in study of recognition for 13 types of aerial objects (Bombers: B-1B, B-52, TU-16, tactical fighters: F-15, F-16, SU-27, MiG-29, MiG-21, Tornado, passenger airplanes: Boeing 737, Airbus A320, cargo airplane AN-26, helicopter AH-64). Simulated flight of aircraft at cruising speeds. The radar station with chirp waveform is considered. The chirp signal bandwidth was 200 MHz. The signal-to-noise ratio was set by random images in the range of 3 - 27 dB. Speed and aspect angle measurement errors can be source of power loss to a 5 dB. Also, speed and aspect angle measurement errors can distort the shape of cumulative range profile obtained in incoherent accumulation. The distortions can widen the HRRP separate peaks that equal to reducing signal bandwidth. As a result the recognition probability for aerial objects can reduce by 30%, and the amount of recognition information can reduce by 50%.

**Keywords:** aerial object recognition, recognition quality, high range resolution profile, mathematical modeling, measurement errors, incoherent accumulation.