

УДК 621.396.96

Г. Д. Братченко

Військовий інститут Одеського національного політехнічного університету, Одеса

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ПО ДВОВИМІРНИХ РАДІОЗОБРАЖЕННЯХ НА БІЧНИХ РАКУРСАХ

Зниження достовірності розпізнавання повітряних цілей (ПЦ) за їх радіолокаційними дальнісними портретами на бічних ракурсах робить актуальним дослідження можливостей використання двовимірних радіозображень (РЗ), які можуть бути отримані при широкосмуговому зондуванні методом інверсного синтезу апертури. У статті представлені результати математичного моделювання відновлення двовимірних РЗ в умовах прямолінійного польоту ПЦ в РЛС сантиметрового діапазону з лінійно-частотно-модульованим сигналом із шириною смуги частот близько 150 МГц. Отримані порівняльні результати розпізнавання літаків по двовимірним РЗ та за сукупністю радіолокаційних дальнісних портретів на ракурсах 75...90 градусів, які вказують на можливий виграш у достовірності автоматичного розпізнавання за рахунок використання двовимірних РЗ. Рішення про належність ПЦ до одного з шести типів приймаються за кореляційним та структурним алгоритмами.

Ключові слова: повітряна ціль, радіолокаційний дальнісний портрет, інверсний синтез апертури, двовимірне радіозображення, алгоритм розпізнавання.

Вступ

При широкосмуговому зондуванні з відбитого сигналу можна отримати інформацію про форму цілі та характер руху її окремих складових частин [1, 2]. Для розпізнавання повітряних цілей (ПЦ) можуть використовуватись радіолокаційні дальнісні портрети (РЛДП) у сполученні з доплерівськими спектрами в окремих елементах розділення по дальності. При високій частоті повторення зондувальних імпульсів і порівняно короткому терміні спостереження ПЦ отримуються дальнісно-частотні портрети, які несуть додаткову інформацію про ознаку роторної (турбінної або пропелерної) модуляції, а при більш тривалому спостереженні - дальнісно-кутові портрети, які є двовимірними радіозображеннями (РЗ) ПЦ [1]. На бічних ракурсах достовірність розпізнавання може зменшитися за рахунок відсутності ознаки турбінної модуляції та впливу ефекту затінення, який призводить до скорочення радіолокаційних дальнісних портретів [1]. Це підтверджується результатами натурного експерименту в лабораторії FGAN (Німеччина) на РЛС TIRA ("Tracking and Imaging Radar") з розпізнавання малорозмірних літаків на ракурсах спостереження від 0 до 360 градусів. Ймовірність вірного розпізнавання на бічних ракурсах на 18...40% нижче порівняно з носовими при зміні ширини смуги частот зондувального сигналу (ЗС) з 800 МГц до 50 МГц [3]. Використання у [3] двовимірних РЗ при фіксованому розділенні близько 1,5 м у напрямку перпендикулярному лінії візування підвищувало ймовірність вірного розпізнавання на бічних ракурсах на 10...25% при зміні ширини смуги частот ЗС від 100 МГц до 50 МГц. Математичне моделювання розпізнавання по одиночним РЛДП восьми типів ПЦ (великого, середнього та

малого розміру) на ракурсах спостереження 75...90 градусів при ширині смуги ЗС 150 МГц показало більш значне зниження достовірності розпізнавання порівняно з розпізнаванням на носових ракурсах [4].

Бічні ракурси, крім того, є найбільш зручними для інверсного (зворотного) синтезу апертури (ІСА), оскільки потребують меншого часу спостереження для забезпечення потрібного кута розвороту цілі. Тому використання двовимірних радіозображень ПЦ, що отримуються методом ІСА, для розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах може бути доцільним. Якість розпізнавання по РЛДП може бути підвищено й застосуванням для прийняття рішення сукупності РЛДП цілі отриманих за час спостереження з виходу амплітудного детектора (АД) [5]. Становить інтерес отримання порівняльної оцінки достовірності розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах за двовимірними РЗ та за сукупністю РЛДП, яка отримується для відновлення РЗ за час спостереження.

Для розпізнавання ПЦ по їх РЛДП широко застосовується кореляційний алгоритм [1 – 4]. Алгоритм обробки для прийняття рішення про клас (тип) цілі за сукупністю РЛДП передбачає накопичення кореляційних сум послідовності одновимірних РЛДП з очікуваними еталонними одновимірними портретами [6]. Розпізнавання ПЦ по двовимірним РЗ також передбачає пошук максимального значення кореляції з еталонними РЗ [6], однак для зниження обчислювальних витрат на розпізнавання за двовимірними РЗ більш прийнятним є використання алгоритму розпізнавання за структурними ознаками, а саме взаємному віддаленні блискучих точок цілі та еталону [1].

Метою статті є визначення доцільності застосування двовимірних РЗ для розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах спостереження.

Результати досліджень

Наукове завдання статті полягає в одержанні порівняльних оцінок якості розпізнавання типу та класу ПЦ на бічних ракурсах спостереження в РЛС із високим розділенням по похилій дальності по сукупності РЛДП та двовимірному РЗ, яке можна отримати по цій сукупності методом ІСА.

В статті вирішуються наступні часткові задачі:

уточнення алгоритмів розпізнавання ПЦ по сукупності РЛДП та по двовимірним РЗ;

математичне моделювання навчання пристрою розпізнавання РЛС на бічних ракурсах спостереження по двовимірним РЗ та РЛДП;

оцінка якості розпізнавання ПЦ за сукупністю РЛДП та по їх двовимірним РЗ.

У випадку розпізнавання ПЦ по сукупності РЛДП кореляційний алгоритм розпізнавання має вигляд [1, 6]:

$$j = \arg \max_j z_j, \quad (1)$$

де $z_j = \sum_{i=1}^N \mathbf{w}_j^T \cdot \mathbf{x}_i$, \mathbf{x}_i – вхідний сигнальний вектор i -го РЛДП з виходу АД; N – кількість РЛДП, по якій приймається рішення; \mathbf{w}_j^T – транспонований нормований еталонний вектор j -го класу ($j = \overline{1, M}$), тобто $\mathbf{w}_j^T \cdot \mathbf{w}_j = 1$.

Порядок отримання еталонних РЛДП описано у [2, 4]. Він передбачає проведення ітераційної процедури для отримання кількох еталонних РЛДП для кожного типу ПЦ у секторі ракурсів спостереження. Кожний еталонний РЛДП є середнім з сукупності портретів, які на попередній ітерації мали максимальне значення кореляційної суми з певним еталонном. Особливість навчання полягає у виборі різної кількості ітерацій для різних типів ПЦ з метою пошуку таких еталонів, що мають найкращу роздільну здатність на обмеженій кількості навчальних РЛДП.

Для випадку розпізнавання по двовимірним РЗ, які являють собою розподіл у площині вікна спостереження сукупності блискучих точок цілі, алгоритм розпізнавання передбачає пошук найближчого до отриманого РЗ еталонного зображення з їх сукупності [1]. Порівнянню зображення з еталонами передують його попередня обробка. А саме: обчислення порогу у тій області вікна спостереження, де зазвичай немає елементів зображення; присвоєння елементам зображення із амплітудами нижче порогу нульових значень; вибір піків, амплітуди яких є максимальними серед усіх їх оточуючих елементів; відкидання в елементі розділення по дальності піків, які мають амплітуду меншу більш, ніж у двічі, за максимальний у цьому елементі пік; обчислення центру тяжіння зображення та зсув його у центр вікна спостереження [1]. Після такої обробки залишається значно менша кількість піків на зображенні, дані про які

зберігаються у вигляді таблиці з координатами піків у вікні спостереження. Як еталонні використовуються подібним же чином отримані РЗ у всьому діапазоні ракурсів спостереження, але тільки на одній фіксованій дальності.

Алгоритм розпізнавання по двовимірним РЗ надається співвідношенням

$$j = \arg \min_j D_j, \quad (2)$$

де $D_j = \max(D_{j,k}, D_{k,j})$,

$$D_{j,k} = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \min_n \left[\left(\frac{x_{j,i} - x_{k,n}}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y_{j,i} - y_{k,n}}{\sigma_y} \right)^2 \right],$$

N_j , $x_{j,i}$, $y_{j,i}$ – кількість піків та координати i -го піку на j -му зображенні у вікні спостереження уздовж і поперек лінії візування відповідно; σ_x – середньоквадратична помилка (СКП) вимірювання дальності уздовж лінії візування; σ_y – СКП вимірювання дальності поперек лінії візування (СКП σ_x та σ_y при моделюванні приймалися однаковими і рівними одиниці).

Результати математичного моделювання розпізнавання ПЦ в РЛС сантиметрового діапазону з лінійно-частотно-модульованим (ЛЧМ) зондувальним сигналом (ЗС) за алгоритмами (1) та (2) отримуються з використанням математичної моделі вторинного випромінювання повітряних об'єктів, яка розроблена під керівництвом Я.Д. Ширмана [1, 2, 7]. Моделюється розпізнавання шести типів ПЦ з класів стратегічних бомбардувальників (СБ): ТУ-16, В-52, В-1В та винищувачів (В): МИГ-21, Торнадо, F-15.

Умови моделювання залишилися такі самі, як і у [4]: довжина хвилі РЛС $\lambda = 3$ см; імпульсний ЛЧМ ЗС тривалістю $\tau_i = 30$ мкс з дев'ятьма частотами $\Delta f = 150$ МГц; ракурси спостереження ПЦ 75...90 град; дальності до цілей 50...150 км; висота польоту ПЦ 5 км. Для навчання пристрою розпізнавання по дальнішим портретам навчальна вибірка складається з 1100 РЛДП для кожного типу ПЦ при їх польоті без впливу турбулентностей атмосфери і середньому відношенні сигнал-шум на один РЛДП 25 дБ. Контрольна вибірка РЛДП для оцінки якості розпізнавання отримується за подібних умов польоту [2, 6, 7].

В результаті навчання пристрою розпізнавання по РЛДП з використанням відомого ітераційного алгоритму отримано по п'ять еталонних РЛДП на кожен тип ПЦ [2, 4]. Приклади еталонних РЛДП наведені у [4].

Еталонні двовимірні РЗ, як і наступні з контрольної вибірки зображень, отримуються за умов прямолінійного польоту літаків без впливу турбулентностей атмосфери. Вирівнювання обвідних РЛДП за дальністю не проводилося, оскільки їх точне суміщення забезпечується у [7] моделюванням безпоми-

лкового супроводження ПЦ у вікні спостереження. Відновленню РЗ передусе лише усунення випадкових початкових фаз РЛДП з виходу фазового детектора застосуванням алгоритму усунення випадкових фаз за сукупністю відбивачів [1]. Після цього виконуються дискретні перетворення Фур'є у кожному елементі розділення за дальністю (рис. 1, а) та попередня обробка РЗ (рис. 1, б).

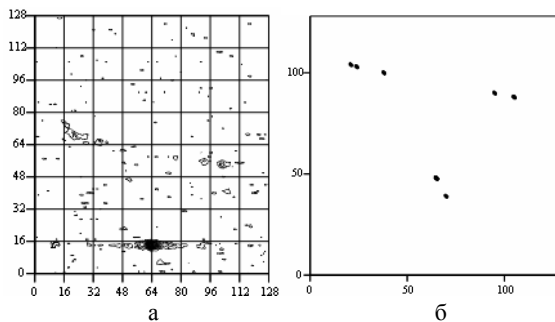


Рис. 1. Приклад радіозображення літака В-52 відновленого накопиченням 64 РЛДП при відношенні с/ш 20 Дб на один РЛДП до й після попередньої обробки (розмір вікна спостереження 64 м x 64 м)

Еталонні РЗ отримуються на дальності спостереження 50 км рівномірно через 1,5 градуси (усього 20 РЗ – 10 при відношенні сигнал-шум 20 дБ та 10 при – 25 дБ на один РЛДП по наборі з 64 портретів). Термін спостереження задається з умови забезпечення кута розвороту ПЦ відносно РЛС $0,86^\circ$, при якому роздільна здатність у напрямку поперечної лінії візування складає, як і у напрямку візування, приблизно 1 м.

За результатами моделювання розпізнавання типів ПЦ при середніх відношеннях сигнал-шум 20 та 25 дБ на один РЛДП для сукупності з 64 портретів отримано оцінки матриць умовних ймовірностей розпізнавання для алгоритмів (1) і (2). Кількості реалізацій для різних типів ПЦ знаходилися у межах від 170 до 217. За даними цих матриць повні помилки розпізнавання типу ПЦ складають 0,54, 0,29 та 0,16, 0,15 для алгоритмів (1) і (2) при відношеннях сигнал-шум 20 та 25 дБ відповідно. При тих же відношеннях сигнал-шум повна помилка розпізнавання класів СБ та В відповідно 0,08, 0,12 і 0,04, 0,02.

Висновки

Результати моделювання підтверджують можливість покращення якості автоматичного розпізнавання типів і класів ПЦ на бічних ракурсах по двовимірних РЗ з роздільною здатністю близько 1 м порівняно з розпізнаванням по сукупності РЛДП, яка застосовується для отримання РЗ.

Попередня обробка РЗ суттєво скорочує часові витрати на розпізнавання по РЗ за структурним алгоритмом, які є меншими, ніж при накопиченні кореляційних сум для сукупності РЛДП.

За умовами моделювання літаки виконували прямолінійний політ за відсутності впливу турбулентностей атмосфери, а адаптація при відновленні РЗ передбачала тільки вирівнювання обвідних РЛДП по дальності та усунення їх випадкових початкових фаз. Виходячи з отриманих результатів, при якісній адаптації до умов польоту ПЦ, перехід до двовимірних РЗ є доцільним не тільки для візуального розпізнавання ПЦ оператором, як це вказано у [4], але й для їх автоматичного розпізнавання на бічних ракурсах.

Список літератури

1. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Леценко С.П., Братченко Г.Д., Орленко В.М. Методи радиолокационного распознавания и их моделирование // *Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники*. – 1996. – №11. – С. 3-63.
2. *Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection, and Tracking* / Y.D. Shirman, S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Y. Sedyshev, O.I. Sukharevskiy / Y.D. Shirman editor. – Boston – London: Artech house, 2002. – 294 с.
3. Rosenbach Kh., Schiller J. *Non Co-operative Air Target Identification using Radar Imagery: Identification Rate as Function of Signal Bandwidth*. – Radar-2000, Alexandria, VA.
4. Братченко Г.Д., Бондаренко О.О. Математичне моделювання розпізнавання повітряних цілей по радіолокаційних портретах на бічних ракурсах // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – X: ХУПС, 2007. – Вип. 2 (14). – С. 49-51.
5. Фархат Н.Х. Формирование радиолокационных изображений методом разнесения в диапазоне СВЧ и автоматизированная идентификация целей, основанная на использовании моделей нейронных сетей // *ТИИЭР*. – 1989. – №5. – С.
6. Братченко Г.Д. Теоретичні моделі і статистичні оптимальні алгоритми обробки ширококугових сигналів при рішенні задачі багатоальтернативного розпізнавання в РЛС з інверсним синтезуванням апертури в умовах дестабілізуючих впливів // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського Національного університету імені Тараса Шевченка*. – К.: ВІКНУ, 2007. – Вип. 7. – С. 15-22.
7. *Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual* / S.A. Gorshkov, S.P. Leshchenko, V.M. Orlenko, S.Yu. Sedyshev, Y.D. Shirman. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.

Надійшла до редколегії 5.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, доцент В.В. Скачков, науковий центр бойового застосування Сухопутних військ, Одеса.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕЛЕЙ ПО ДВУМЕРНЫМ РАДИОИЗОБРАЖЕНИЯМ НА БОКОВЫХ РАКУРСАХ

Г.Д. Братченко

Снижение достоверности распознавания воздушных целей (ВЦ) по их радиолокационным дальностным портретам на боковых ракурсах делает актуальным исследование возможностей использования двумерных радиоизображений (РИ), которые могут быть получены при широкополосном зондировании методом инверсного синтеза апертуры.

В статье представлены результаты математического моделирования восстановления двумерных РИ в условиях прямолинейного полета ВЦ в РЛС сантиметрового диапазона с линейно-частотно-модулированным сигналом с шириной полосы частот около 150 МГц. Получены сравнительные результаты распознавания самолетов по совокупности радиолокационных дальностных портретов и по двумерным РИ на ракурсах 75...90 градусов. Решения о принадлежности ВЦ к одному из шести типов принимаются по корреляционному и структурному алгоритмам. Результаты указывают на возможный выигрыш в достоверности автоматического распознавания за счет использования двумерных РИ.

Ключевые слова: *воздушная цель, радиолокационный дальностный портрет, инверсный синтез апертуры, двумерное радиоизображение, алгоритм распознавания.*

MATHEMATICAL SIMULATION OF RECOGNITION OF AIRBORNE TARGET BY 2-D RADAR IMAGES AT SIDE ASPECTS

G.D. Bratchenko

Decrease in reliability of recognition of air targets (AT) on their radar high range resolution profiles at side aspects does actual research of possibilities of using the 2-D radar target images which can be gained at broad-band probing by a method of inverse synthesis of the antenna aperture. In paper results of mathematical simulation of restoration the 2-D radar target images in the conditions of rectilinear AT flight are presented to the centimeter radar with the linearly-frequency-modulated signal with bandwidth about 150 MHz. Comparative results of recognition of airplanes on set radar high range resolution profiles and on the 2-D radar target images are given for the side target aspects of 75...90 degrees. Solutions on fittings air target to one of six types are accepted on correlation and structural algorithms. Results indicate a possible scoring in reliability of automatic recognition at the expense of use the 2-D radar target images.

Keywords: *airborne target, radar high range resolution profile, inverse synthesis of the antenna aperture, 2-D radar image, recognition algorithm.*