

УДК 621.396.96

Г.Д. Братченко, О.О. Бондаренко

Одеський орденена Леніна інститут Сухопутних військ, Одеса

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ ПО РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ПОРТРЕТАХ НА БІЧНИХ РАКУРСАХ

*З метою оцінки доцільності отримання двовимірних радіозображень (РЗ) для розпізнавання повітряних цілей (ПЦ) в РЛС сантиметрового діапазону з лінійно-частотно-модульованим сигналом з шириною смуги частот близько 150 МГц отримані результати математичного моделювання їх розпізнавання за радіолокаційними дальнісними портретами на бічних ракурсах. При моделюванні використані математичні моделі, що побудовані за методом простіших компонентів під керівництвом Ширмана Я.Д. Рішення про належність ПЦ до одного з восьми типів приймається за кореляційним алгоритмом, а також з його різновидом, що запропонований Баггенстосом П.М. У доповіді представлені результати навчання РЛС та розпізнавання ПЦ на ракурсах 75...90 градусів. За результатами моделювання підтвердилося очікуване зниження якості розпізнавання ПЦ, особливо середнього розміру, яке виявлене Розенбахом і Шиллером за результатами натурального експерименту. Вказані доцільні напрямки застосування двовимірних РЗ, що отримуються шляхом інверсного синтезування апертури.*

### *повітряна ціль, радіолокаційний дальнісний портрет, алгоритм розпізнавання*

Розпізнавання повітряних цілей (ПЦ) на бічних ракурсах становить інтерес при спостереженні цілей, що баражують уздовж кордону, порушників режиму польоту, або цілей, які пролітають у напрямках об'єктів, що значно віддаленні по фронту від РЛС виявлення-розпізнавання.

Оцінки якості розпізнавання ПЦ по їх радіолокаційних дальнісних портретах (РЛДП), які отримані за результатами натурального експерименту в лабораторії FGAN (Німеччина) на РЛС TIRA ("Tracking and Imaging Radar") для ракурсів спостереження ПЦ від 0 до 360 градусів, показали, що ймовірність вірного розпізнавання знижується на бічних ракурсах порівняно з носовими на 18...40 % при зміні ширини смуги частот зондувального сигналу (ЗС) з 800 до 50 МГц [1]. Для розпізнавання використовувався алгоритм, що застосовував правило «найближчого сусіда». Рішення приймалося за максимумом кореляції з набором експериментальних еталонних РЛДП. Розпізнавалися шість типів літаків довжиною приблизно 15 м. Використання в цьому випадку двовимірних радіозображень (РЗ) при фіксованому розділенні близько 1,5 м у напрямку перпендикулярному лінії візування підвищувало ймовірність правильного розпізнавання на 10...25% при зміні ширини смуги частот ЗС від 100 до 50 МГц. При цьому якість розпізнавання на бічних ракурсах спостереження все ж була нижче, ніж на носових ракурсах.

Особливостями розпізнавання цілей на бічних ракурсах є:

можливе різке укорочення РЛДП за рахунок затінення корпусом елементів відбиття на дальшому від РЛС крилі ПЦ, що може знизити якість розпізнавання;

значне зростання внеску дзеркального відбиття від фюзеляжу ПЦ різко змінює форму РЛДП, що

необхідно враховувати при навчанні РЛС;

на таких ракурсах потрібно менше часу для одержання двовимірних РЗ шляхом інверсного синтезу апертури (ІСА), тому їхнє відновлення може бути доцільним для підвищення якості розпізнавання в порівнянні з розпізнаванням по РЛДП.

Додатковою перевагою використання двовимірних РЗ є візуальна оцінка оператором типу невідомої ПЦ або відомої, але з додатковими підвісками, що могли не враховуватися при навчанні пристрою розпізнавання. Однак досить тривале спостереження ПЦ для ІСА, у випадку відомих типів ПЦ не потрібне, оскільки набагато менша кількість РЛДП забезпечить при послідовному розпізнаванні ймовірність розпізнавання близьку до одиниці [2]. Процес накопичення РЛДП із метою одержання РЗ можна перервати, якщо забезпечується перевищення порогу в процедурі послідовного розпізнавання на користь якого-небудь відомого типу ПЦ. У протилежному випадку воно може продовжуватися до одержання двовимірних РЗ, по якому ПЦ може класифікуватися візуально оператором для подальшого навчання пристрою розпізнавання РЛС.

Для прийняття рішення про належність ПЦ до певного класу з наперед заданої їх сукупності за їх РЛДП широко застосовується кореляційний алгоритм [1, 2, 4]. У [5] пропонується його різновид, який додатково враховує закон розподілу ймовірностей кореляційних сум, що може підвищити якість розпізнавання.

Представляє інтерес дослідження можливості використання «Class-Specific» методу та алгоритму розпізнавання з [5] для підвищення якості розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах за їх РЛДП.

Метою статті є оцінка якості розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах спостереження і можливостей його підвищення в РЛС із високим розділенням по похилій дальності.

Наукове завдання статті полягає в одержанні оцінок якості розпізнавання типу ПЦ на бічних ракурсах спостереження в РЛС із високим розділенням по похилій дальності для різних вирішальних правил.

Для рішення цієї задачі в статті вирішуються наступні часткові задачі:

уточнення алгоритму розпізнавання ПЦ на основі «Class-Specific» методу стосовно застосування РЛДП;

математичне моделювання навчання пристрою розпізнавання РЛС на бічних ракурсах спостереження;

оцінка якості розпізнавання ПЦ по їх РЛДП для різних вирішальних правил і варіантів навчання.

Відомий кореляційний алгоритм розпізнавання

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

де  $z_j = \left| \mathbf{w}_j^T \cdot \mathbf{x} \right|^2$ ,  $\mathbf{x}$  – вхідний сигнальний вектор;  $\mathbf{w}_j^T$  – транспонований еталонний нормований вектор  $j$ -го класу, тобто  $\mathbf{w}_j^T \cdot \mathbf{w}_j = 1$ , перетворено у [5] до вигляду

$$j = \arg \max_j \left[ \log J(\mathbf{x}, z_j) + \log p(z_j | H_j) \right], \quad (2)$$

де  $\log J(\mathbf{x}, z_j)$  – логарифм якобіана переходу  $\log J(\mathbf{x}, z_j) = 0,5(\log z_j + z_j) + C(\mathbf{x})$ , в якому останній член не залежить від  $j$  і тому може бути відкинтий;  $p(z_j | H_j)$  – щільність ймовірностей ознаки  $z_j$  за наявності сигналу  $j$ -го класу. Якобіан представленого вигляду отримано у [5] за умови гіпотези  $H_0$  щодо наявності на вході пристрою розпізнавання гаусівської послідовності незалежних відліків з нульовим математичним сподіванням та одиничною дисперсією за співвідношенням  $\log J(\mathbf{x}, z_j) = \log p(\mathbf{x} | H_0) - \log p(z_j | H_0)$ .

При розпізнаванні ПЦ, особливо на бічних ракурсах, ефективна площа розсіяння (ЕПР) цілей має значний динамічний діапазон зміни. Це ускладнює безпосередню оцінку щільності розподілу  $p(z_j | H_j)$ . Більш зручно експериментально оцінювати щільність розподілу  $p_y(y | H_j)$  для величини  $y = \log z_j$ . З урахуванням якобіану переходу  $\left| \frac{dy}{dz_j} \right| = 1/z_j$  алгоритм (2) матиме вигляд

$$j = \arg \max_j \left[ 0,5(z_j - \log z_j) + \log p_y(\log z_j | H_j) \right]. \quad (3)$$

Оскільки амплітуда відбитого сигналу має значні зміни за рахунок впливу різних нестабільностей у тракті проходження сигналу, то точність оцінювання величини ЕПР може стати незадовільною. Для прийняття рішення про клас ПЦ у такому випадку застосовується нормована кореляційна сума  $z_{nj} = \left| \mathbf{w}_j^T \cdot \mathbf{x} / \|\mathbf{x}\| \right|^2$ , де  $\|\mathbf{x}\|$  – евклідова норма вектора  $\mathbf{x}$ , і алгоритм (2) пропонується представити у вигляді

$$j = \arg \max_j \left[ \sqrt{z_{nj}} \cdot e^{0,5z_{nj}} p(z_{nj} | H_j) \right]. \quad (4)$$

Якщо урахувати наближеність залежності доданку перших двох членів у (4) до лінійної (на робочій ділянці (0,15, 1) відносна похибка менша за 2%) (рис. 1) алгоритм спроститься

$$j = \arg \max_j \left[ (0,2 + 1,426z_{nj}) p(z_{nj} | H_j) \right]. \quad (5)$$

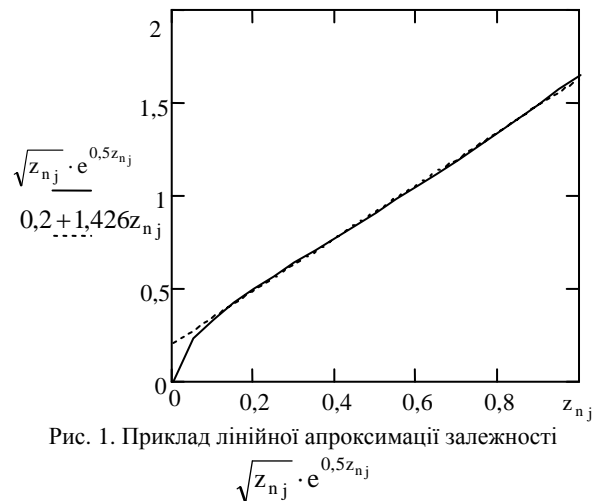


Рис. 1. Приклад лінійної апроксимації залежності  $\sqrt{z_{nj}} \cdot e^{0,5z_{nj}}$

У статті представлені результати математичного моделювання розпізнавання ПЦ в РЛС сантиметрового діапазону з лінійно-частотно-модульованим (ЛЧМ) зондувальним сигналом (ЗС) за алгоритмами (1) та (5). При моделюванні використовувалася математична модель вторинного випромінювання повітряних об'єктів, яка розроблена під керівництвом Ширмана Я.Д. [2, 4, 6, 7]. Моделювалося розпізнавання трьох класів ПЦ стратегічних бомбардувальників: ТУ-16, В-52, В-1В; винищувачів: МИГ-21, Торнадо, F-15; крилатих ракет: ALCM, GLCM.

Умови моделювання: ракурси спостереження 75...90 град, довжина хвилі  $\lambda = 3$  см, імпульсний ЛЧМ ЗС  $\tau_i = 30$  мкс,  $\Delta f = 150$  МГц, висота польоту ПЦ 5 км, дальності до цілей 50...150 км. Для навчання пристрою розпізнавання навчальна вибірка включала по 1100 РЛДП для кожного типу ПЦ при їх польоті без впливу турбулентностей атмосфери і середньому відношенні сигнал-шум на один РЛДП 25 дБ. Однак, для літаків ТУ-16, В-52 вводилося додаткове обмеження на ЕПР ПЦ, яке виключало

## Висновки

РЛДП із надто великою ЕПР (більше  $400 \text{ м}^2$ ), які викликані потужним дзеркальним відбиттям. Для оцінки якості розпізнавання контрольна вибірка РЛДП отримувалася за подібних умов польоту, але із імітуванням впливу турбулентності практично спокійної атмосфери [2, 6, 7].

На першому етапі навчання пристрою розпізнавання отримано еталонні РЛДП (по п'ять на кожен тип ПЦ) з використанням відомого ітераційного алгоритму навчання, що використовувався Лещенко С.П. [2] для одержання результатів розпізнавання на ракурсах спостереження близьких до носових (рис. 2). На другому – за методом Парзена [2] обчислено щільності ймовірностей  $p(z_{nj}|H_j)$ ,  $j = \overline{1,8}$  (рис. 3).

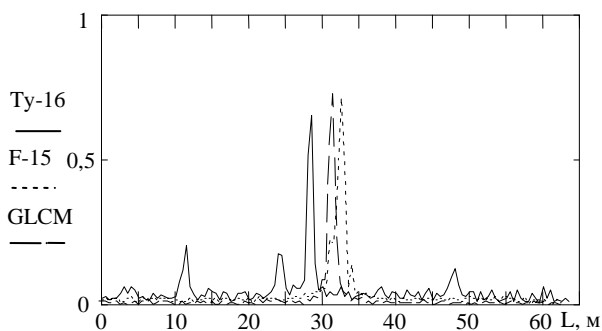


Рис. 2. Приклади еталонних РЛДП за результатами навчання

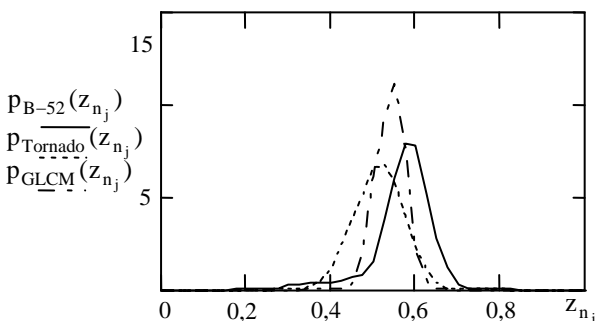


Рис. 3. Приклади щільностей розподілів ймовірностей за результатами навчання

За результатами моделювання розпізнавання типів ПЦ при відношеннях сигнал-шум 20, 25 та 30 дБ отримано матриці умовних ймовірностей розпізнавання типів ПЦ для алгоритмів (1) і (5). За даними цих матриць отримані значення повної помилки розпізнавання типу і класу ПЦ. Повна помилка розпізнавання типу ПЦ виявилася значно вищою, ніж на носових ракурсах спостереження ПЦ і складала для алгоритму (1) - 0,77, 0,64, 0,66, а для алгоритму (5) – 0,75, 0,82, 0,85 при відношеннях сигнал-шум 20, 25 та 30 дБ відповідно. При тих же відношеннях сигнал-шум повна помилка розпізнавання класів цілей складала 0,54, 0,46 і 0,43 для алгоритму (1), 0,42, 0,53, 0,63 для алгоритму (5).

Отримані результати підтвердили припущення про можливе погіршення якості розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах. Вона виявилася гіршою за якість розпізнавання на бічних ракурсах за результатами отриманими у [1]. Одною з причин такої відмінності може бути більш велика потужність власних шумів приймача при моделюванні розпізнавання РЛДП, ніж вона була при експериментальних дослідженнях у [1]. Запропонований алгоритм розпізнавання (5) виявився незначною мірою кращим лише при відношенні сигнал-шум 20 дБ, для інших же відношень – він поступався звичайному кореляційному. Тому потрібне подальше дослідження можливості застосування алгоритмів виду (2) – (5), отриманих «Class-Specific» методом для підвищення якості розпізнавання ПЦ.

Виходячи з отриманих результатів, для покращання розпізнавання ПЦ на бічних ракурсах, може бути доцільний перехід до двовимірних РЗ, хоча у [1] зображення давали приріст якості розпізнавання лише при ширині смуги зондувального імпульсу менше за 100 МГц. На доцільність отримання РЗ вказують також відмічені у статті їх додаткові переваги щодо візуального розпізнавання ПЦ оператором.

## Список літератури

1. Rosenbach Kh., Schiller J. *Non Co-operative Air Target Identification using Radar Imagery: Identification Rate as Function of Signal Bandwidth*. – Radar-2000, Alexandria, VA.
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. Sedyshv, O.I. Sukharevskiy / Y.D. Shirman editor. – Boston – London: Artech house, 2002. – 294 с.
3. Фу К. *Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин*. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1971. – 256 с.
4. Ширман Я.Д., Горшков С.А., Лещенко С.П., Братченко Г.Д., Орленко В.М. *Методы радиолокационного распознавания и их моделирование* // *Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники*. – 1996. – № 11. – С. 3-63.
5. Paul M. Baggenstoss. *The Class-Specific Classifier: Avoiding the Curse of Dimensionality* // *IEEE A&E Systems Magazine*. – Jan 2004. – Vol 19, no. 1. – P. 37-52.
6. Орленко В.М., Лещенко С.П., Братченко Г.Д., Ширман Я.Д. *Сигнально-траекторная "оболочка" модели вторичного излучения* // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 1999. – Т. 4, № 3. – С. 38-43.
7. *Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual* / Gorshkov S.A., Leshchenko S.P., Orlenko V.M., Sedyshv S.Yu, Shirman Y.D. – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.

Надійшла до редколегії 19.03.2007

**Рецензент:** канд. військ. наук проф. В.М. Оленев, Науковий центр бойового застосування Сухопутних військ (при ОоЛІСВ), Львів.