Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2020. Вип. № 3(5)
ISSN 2706-7386
УДК 621.396 DOI: 10.37701/dndivsovt.5.2020.02

Ветошкін О.Г., Артикула А.Г., Бритов Д.М. *Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИРІШЕННЯ ЗАВДАННЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРОТЯЖНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ЦІЛЕЙ

На сучасному етапі розвитку теорії і техніки радіолокації суттєво підвищились вимоги до об'єму та якості радіолокаційної інформації, яка отримана в умовах складної повітряної обстановки та малого часу радіолокаційного спостереження повітряних цілей. Збільшення кількості типів засобів повітряного нападу, зменшення їх радіолокаційної помітності та розширення кола вирішуємих ними завдань, при різноманітті льотно-технічних характеристик, удосконалення тактичних прийомів подолання системи протиповітряної оборони, з одночасним застосуванням крилатих та протирадіолокаційних ракет, хибних цілей та імітуючих перешкод, підвищує значення радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей.

У роботі наведені результати аналізу сучасних методів вирішення завдання радіолокаційного розпізнавання протяжних за просторовими координатами цілей. Наведено результати аналізу відомих алгоритмів радіолокаційного розпізнавання просторово-протяжних аеродинамічних об'єктів.

Ключові слова: радіолокаційні системи, радіолокаційне розпізнавання, алгоритми радіолокаційного розпізнавання, роздільна здатність.

Вступ. Постановка проблеми. Розвиток теорії і техніки радіолокації свідчить про необхідність вирішення завдань радіолокаційного розпізнавання цілей за просторовими параметрами. Це обумовлено потрібністю забезпечення у перспективних радіолокаційних станціях (комплексах) з програмним оглядом потрібної для отримання об'ємних зображень роздільної здатності за всіма просторовими координатами.

Завдання радіолокаційного розпізнавання цілей, яке полягає у віднесенні об'єктів, що спостерігаються, до відповідних класів і типів, викликають значний і зростаючий інтерес. Класи (типи) цілей, що розрізняються, складають певний алфавіт, вибір якого визначає не тільки ефективність використання розпізнавання, але й труднощі, що виникають при його реалізації. Надмірне розширення алфавіту класів знижує вірогідність інформації (особливо при низьких відношеннях сигнал-шум) [1]. У загальному випадку оптимізація алфавіту класів є комплексним завданням, що вирішується шляхом порівняння варіантів.

Інформація, потрібна для радіолокаційного розпізнавання, міститься у сукупності радіолокаційних ознак, які приймаються. На теперішній час, найчастіше, використовують певні виміряні ознаки цілі, які дозволяють провести їх порівняння, відповідно до алгоритмів розпізнавання, з відомими (еталонними) ознаками. Окремо взята ознака не забезпечує, зазвичай, розпізнавання класу цілі у потрібному алфавіті з вірогідністю не гірше заданої. Використання сукупності незалежних ознак дозволяє підвищити якість розпізнавання або розширити алфавіт класів.

Загальних правил визначення найбільш інформативних ознак не існує [2]. Відомі два основні напрямки: евристичний і фізичний. Перший – пов'язаний із застосуванням певних математичних перетворень форми сигналу і значним перебором маси даних ознак, які виявлені. Другий – зорієнтований на дослідженні інформаційних властивостей окремих параметрів сигналу (або полів) та їх перетворень, що характеризують певні фізичні властивості цілей, які розпізнаються. Найбільш перспективним вважається другий напрямок [3].

Першочергову роль в отриманні класифікаційної інформації про об'єкти, що розпізнаються, відіграють радіолокаційні станції з високою роздільною здатністю по дальності, частоті сигналів і кутових координатах цілі, які дозволяють отримувати детальну інформацію про форму і розміри об'єктів, що опромінюються [3] – зображень певного виду,

© Ветошкін О.Г., Артикула А.Г., Бритов Д.М., 2020

що мають чіткий контурний обрис або напівтоновий перехід від фону до зображення і, крім того, внутрішнє півтонове заповнення.

Протяжні радіолокаційні цілі, тобто, цілі, які розрізняються за просторовими координатами, необхідно відносити до тіл складної форми. Відбите поле від об'єктів, що відносяться до певного класу, в основному, складається з полів, які розсіяні окремими областями освітленої частини їх поверхні (ділянок локального відбиття) [4].

Радіолокаційну ціль, яка розпізнається, необхідно розглядати як неоднорідність середовища поширення (з електромагнітними властивостями, відмінними від властивостей середовища), що займає випадкове положення в просторі і має випадкову форму. Прийнято розрізняти прості і складні цілі. До простих цілей відносяться – куля, пластина і тому подібні об'єкти простої геометричної форми. На відміну від них реальні цілі мають складну форму, до яких цілком обґрунтовано можна віднести всі засоби повітряного нападу, оскільки вони мають криволінійну форму і лише окремі їх ділянки можуть розглядатися як тіла простої форми.

У більшості радіолокаційних цілей поверхня лише на окремих ділянках збігається з поверхнею тіл простої форми, а загалом вона може бути довільною. Аналіз експериментів, які були проведені відносно тіл порівняно простої форми, дозволяє використовувати метод індукції [4] та виявити ділянки локального відбиття. Це, по-перше, область поблизу точки дзеркального відбиття; по-друге, ділянки з'єднання різних видів поверхонь; і по-третє, контур, що розділяє освітлену частину поверхні від тіньової.

До сучасних радіолокаційним систем, які призначені для виявлення рухомих цілей на фоні поверхні, що підлягає, висуваються наступні основні вимоги: всепогодність, цілодобовість, автономність щодо прийняття рішення, висока роздільна здатність, висока завадозахищеність (завадостійкість). Перспективні радіолокаційні комплекси повинні забезпечувати виявлення та розпізнавання різних типів цілей при різних умовах перешкод.

Раціональна побудова сучасних радіолокаційних систем обумовлює необхідність проведення досліджень виявлення і виділення нових інформативних ознак різних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує велика кількість алгоритмів радіолокаційного розпізнавання. Вони розрізняються етапністю прийняття рішення, ступенем і характером обліку статистики ознак, перешкод, сигналів. У зв'язку з тим, що діаграма зворотного вторинного випромінювання протяжних цілей багатопелюсткова, перевагу віддають статистичним алгоритмам.

Серед статистичних алгоритмів розрізняють: параметричні (байєсовські і небайєсовські), непараметричні і нейрокомп'ютерні [1]. Байєсовські параметричні алгоритми, на відміну від параметричних небайєсовськіх, враховують не тільки статистику параметрів перешкод, флуктуацій сигналів і ознак, але і певні гіпотези щодо апріорної ймовірності різних елементів алфавіту класів, а також неоднакову значимість різних похибок і правильних рішень для споживача інформації.

Використання гаусовської статистики полів, які відбиті тілами складної форми, при вирішенні завдання радіолокаційного розпізнавання невиправдане. Це твердження базується на аналізі припущень, сформульованих в наближенні Делано, які виглядають наступним чином [4]:

1) фази сигналів, відбитих від ділянок локального розсіювання, являються взаємно незалежними на інтервалі $(0, 2\pi)$;

2) амплітуди цих хвиль однакові;

3) миттєві значення амплітуди відбитого поля розподілені за нормальним законом, оскільки кількість ділянок локального розсіювання велика.

У разі радіолокаційного розпізнавання аеродинамічних цілей в об'ємі, що розрізняються, кількість "блискучих точок" буде не настільки великою, щоб апроксимувати результуюче поле гаусівською статистикою і, крім того, інтенсивності сигналів відбитих від різних ділянок, скоріш за все, будуть значно відрізнятися.

Таким чином, при вирішенні завдання радіолокаційного розпізнавання протяжних цілей апріорна невизначеність має завжди непараметричний характер (закон розподілу відбитого сигналу невідомий). Для подолання зазначених труднощів потрібно застосовувати спеціальні методи статистичного синтезу систем, в умовах непараметричної апріорної невизначеності. До них, зокрема, відносяться [3]: адаптивний байєсовський підхід, методи стохастичної апроксимації і ряд інших. Далі, оцінивши статистику, використовуючи відомі алгоритми можна вирішити задачу радіолокаційного розпізнавання протяжних цілей.

Крім вищевикладеного, необхідно відзначити, що перспективним є напрямок комплексування вирішення завдань радіолокаційного спостереження. Зокрема, одночасне розділення і розпізнавання складної цілі. Тому, завдання радіолокаційного розпізнавання, у даному випадку, полягає у вирішенні завдання повного розділення, тобто, у визначенні числа екстремумів і оцінці їх параметрів, і в одночасному вирішенні задачі розпізнавання тіла складної форми. Це означає, що запропонований підхід можна розглядати як багатокритеріальне завдання векторної оптимізації, якщо число критеріїв дорівнює трьом, які відповідають визначенню числа екстремумів, оцінці їх параметрів і розпізнавання.

Мета статті – визначення підходів до вирішення завдання розпізнавання протяжних радіолокаційних цілей у перспективних радіолокаційних засобах огляду та супроводження.

Виклад основного матеріалу. Завдання побудови систем розпізнавання образів полягає в першу чергу у визначенні оптимальних процедур, необхідних при розпізнаванні. Якщо відносно цілей, які розпізнаються є повні відомості, вирішальні функції можуть бути визначені точно на основі цієї інформації. Але, як правило, при радіолокаційному розпізнаванні доступні лише не багаточисельні (якщо вони взагалі є) апріорні відомості щодо цілей, які розпізнаються.

Інформація, яка використовується для радіолокаційного розпізнавання, міститься в сукупності прийнятих радіолокаційних сигналів. Однак, найчастіше, для розпізнавання цілі, використовують певні виміряні ознаки цілі, які співставляють відповідно до алгоритмів розпізнавання з відомими (еталонними) ознаками.

Аналіз відомих алгоритмів радіолокаційного розпізнавання протяжних цілей показує, що вони розроблялися в умовах суттєвих обмежень.

Так у роботі [5] запропоновано нові алгоритми отримання інформації відносно просторово-протяжних об’єктів, які базуються на отриманні оцінок моментів функції густини інтенсивності “блискучих точок”. При їх синтезі передбачалося, що обробка розпадається на просторову і тимчасову. Крім того, порядок спостережуваного об’єкта (число оцінюваних моментів) вважається апріорі відомим.

Необхідно також відзначити алгоритми розпізнавання та ідентифікації складних цілей, які наведені в роботі [3], при цьому використовується два підходи.

Перший полягає в побудові оптимальних вирішальних правил при невідомих законах розподілу величин ознак. В якості ознак розпізнавання використовувалися характеристики цілі, яка представлена у вигляді сукупності точкових відбивачів. Основними недоліками цього підходу є велика розмірність простору ознак і велике число еталонів, що призводить до невиправдано великих обчислювальних витрат.

У другому випадку протяжний об’єкт представлявся у вигляді системи безперервно розподілених опромінювачів. При цьому ідентифікація цілі здійснюється оцінкою збігу законів розподілу ознак радіолокаційних сигналів від спостережуваного тіла складної форми, за законами розподілу еталонних значень ознак відомих цілей в діапазонах кутів їх опромінення. Головною перевагою даного підходу, в порівнянні з попереднім, служить допустимість використання тільки одного зразка, але для побудови емпіричної функції розподілу потрібно багаторазове опромінення ідентифікованої цілі. Зазначений алгоритм ідентифікації синтезований при допущенні, що оцінювана функція є строго гладкою. Насправді функція розподілу амплітуди відбитого сигналу має як дискретну, так і безперервну складові.

З аналізу відомих алгоритмів радіолокаційного розпізнавання просторово-протяжних аеродинамічних об'єктів можна зробити наступні висновки. Жоден з них не враховує повною мірою особливості процесу формування відбитого поля при забезпеченні високого розрізнення за всіма просторовими координатами. Іншими словами, використовується або тільки дискретна (багатоточкова) модель подання складної цілі, або строго безперервна. Вибір ознак розпізнавання проводиться, як правило, евристично. Цей набір параметрів далеко не завжди здатний забезпечити необхідну якість розпізнавання. Синтезовані алгоритми працюють нестабільно або ж вимагають невиправдано великих обчислювальних витрат, обумовлених істотним підвищенням розмірності простору ознак.

У роботі з метою аналізу можливостей селективної вибірковості розглядаються кілька алгоритмів виявлення і розпізнавання класів цілей. При парному порівнянні сигнал від однієї з цілей відноситься до класу корисних, від іншої – до перешкод.

При використанні статистичного підходу для вирішення задач виявлення і розпізнавання нормально розподіленого корисного сигналу на фоні перешкод квазіоптимальні алгоритми мають вигляд [6]:

$$\frac{1}{\Delta f\, S_0}\sum_{k=1}^{N} x_k^2 - \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}\lambda_{ik}\left(x_i-\mu_i\right)\left(x_k-\mu_k\right) \geqslant \gamma_1; \tag{1}$$

$$-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}\lambda_{ik}^{c}\left(x_i-\mu_i^{c}\right)\left(x_k-\mu_k^{c}\right)+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{N}\lambda_{ik}^{n}\left(x_i-\mu_i^{n}\right)\left(x_k-\mu_k^{n}\right)\geq\gamma_2, \tag{2}$$

де Δf – смуга пропускання приймального тракту;

S_0 – спектральна густина шуму в смузі Δf ;

x_i, x_k – оцінки випадкових параметрів прийнятого сигналу;

μ_i, μ_k – математичні очікування випадкових параметрів x_i, x_k ;

λ_{ik} – елементи матриці, яка є зворотною до коваріаційної матриці $c=\left[c_{ik}\right]=\left[\left(x_i-\mu_i\right)\left(x_k-\mu_k\right)\right]$;

N – розмірність вектору інформативних ознак;

γ_1, γ_2 – порогові рівні в алгоритмах виявлення і розпізнавання, відповідно;

верхні індекси "c" і "n"–приналежність параметрів сигналу або перешкоді, відповідно.

Регресивні алгоритми виявлення і розпізнавання реалізуються за допомогою множинної початкової регресії:

$$g_i=\sum_{k=1,k^1 i}^{N}\beta_{ik}\chi_k,\quad i=\overline{1,N}, \tag{3}$$

де β_{ik} – коефіцієнт множинної початкової регресії.

Коефіцієнти множинної початкової регресії розраховуються, виходячи з умови мінімуму середнього значення квадрата, помилки множинних початкових регресійних представлень [5]:

$$\overline{\psi_0^2}=E\left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\sum_{k=1,k\neq i}^{N}\beta_{ik}\chi_k\right)^2\right], \tag{4}$$

де $E[\ ]$ – оператор математичного очікування.

Алгоритми роботи багатоканальної регресійної системи виявлення та системи розпізнавання відповідно, мають вигляд:

$$\frac{1}{\Delta f\, S_0}\sum_{i=1}^{N}\chi_i^2-\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{N}\Lambda_{ii}\left(x_i-\sum_{k=1,k\neq i}^{N}\beta_{ik}\chi_k\right)^2\geq\gamma_1^*; \tag{5}$$

$$-\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{N}\Lambda_{ii}^{c}\left(x_i-\sum_{k=1,k\neq i}^{N}\beta_{ik}^{c}\chi_k\right)^2+\frac{1}{4}\sum_{i=1}^{N}\Lambda_{ii}^{n}\left(x_i-\sum_{k=1,k\neq i}^{N}\beta_{ik}^{c}\chi_k\right)^2\geq\gamma_2^*, \quad (6)$$

де γ_1^*, γ_2^* – порогові рівні у регресійних алгоритмах виявлення і розпізнавання, відповідно;

Λ_{ii}^{c}, Λ_{ii}^{n} – елементи матриці $\Lambda = K^{-1}$, зворотної матриці кореляційних моментів.

Регресивні алгоритми багатоканальної системи виявлення та розпізнавання можна також реалізувати на основі використання множинної центральної регресії. При цьому в формулах (5) і (6) величини, що входять до них, мають бути центровані.

Висновки:

1. Основним завданням радіолокаційного розпізнавання аеродинамічних цілей є виявлення класифікаційних ознак, які містять найбільший обсяг інформації про об’єкти розпізнавання, при найменшій розмірності простору їх опису, оскільки, тільки в цьому випадку може бути реалізований синтез систем радіолокаційного розпізнавання відповідно до критерію "ефективність-вартість”.

2. Розподіл цілей на прості та складні обумовлює подальший шлях розвитку систем просторово-часової обробки радіолокаційних сигналів. На теперішній час найбільш повно вирішені завдання радіолокаційного впізнавання поодиноких цілей. Завдання обробки сигналів, відбитих від тіл складної форми, з огляду на труднощі їх постановки і вирішення, досліджені далеко не в повному обсязі.

3. Перспективним є розгляд сукупності завдань радіолокаційного спостереження із застосовуванням багатокритеріального представлення, вирішення якого пов’язане з багатопараметричною оптимізацією локаційної системи в цілому.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ширман Я.Д. 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.

2. Распознавание классов и типов воздушных объектов по двумерным радиолокационным изображениям в обзорной РЛС / В.П. Бердышев, О.Н. Помазуев, А.Н. Савельев, М.А. Смолкин, В.А. Копылов, В.В. Лой // Красноярськ: Сибірський федеральний університет, 2019. – № 12(1). – С. 18-29. – DOI: 10.17516/1999-494X-0102.

3. 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. – DOI: 10.30748/nitps.2018.33.08.

4. Лещенко С.П. Радіолокаційне розпізнавання повітряних об'єктів по їх дальнісним портретам та залученням додаткових ознак / С.П. Лещенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2020. – № 4(33). – С. 83-92. – DOI: 10.30748/nitps.2020.39.10

5. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов; пер с англ.; под ред. А.А. Дорофеюка. – М.: Наука, 1979. – 363 с.

6. Давыдов В.С. Радиолокация сложных целей / А.П. Лукошкин, А.А. Шаталов, А.Б. Ястребков. – С-Пб.: Янис, 1993. – 280 с.

7. Штагер Е.А. Рассеяние волн на телах сложной формы / Е.В. Чаевский. – М.: Советское радио, 1974. – 240 с.

8. Монаков А.А. Наблюдение пространственно-протяженных целей в радиолокационных системах с фазированными антенными решетками / Радиотехника. – 1999. – №3. – С. 3-8.

9. Хохлов В.К. Обнаружение, распознавание и пеленгация объектов в ближней локации: учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 336 с.

Ветошкін Олександр Георгійович
науковий співробітник Державного науково–дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0003-3979-9916
+38097-508-59-98

Aleksandr Vetoshkin
Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-3979-9916
+38097-508-59-98

Артикула Андрій Геннадійович
старший науковий співробітник Державного науково–дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0001-9535-5442
+38097-288-06-63

Andriy Artikula
Senior Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-9535-5442
+38097-288-06-63

Бритов Дмитро Михайлович
науковий співробітник Державного науково–дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна
https://orcid.org/0000-0001-7607-336X
+38063-641-34-52

Dmytro Britov
Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0001-7607-336X
+38063-641-34-52

OVERVIEW OF MODERN APPROACHES TO SOLVING THE PROBLEM OF EXTENDED RADAR TARGETS RECOGNITION

A Vetoshkin, A Artikula and D Britov

The development of the theory and technology of radio location indicates the need to solve problems of radar recognition of targets by spatial parameters. This is due to the need to provide in promising radar stations (complexes) with a software overview of the required resolution to obtain three-dimensional images in all spatial coordinates.

The task of radar targets recognition, which is to assign the observed objects to the appropriate classes and types, is of considerable and growing interest. Different classes (types) of targets make up a certain alphabet, the choice of which determines not only the effectiveness of the use of recognition, but also the difficulties that arise in its implementation.

Currently, there are a large number of radar recognition algorithms. They differ in the stages of decision-making, the degree and nature of accounting for statistics of signs, obstacles and signals. Due to the fact that the secondary emission pattern of extended targets is multi-lobed, statistical algorithms are preferred.

The information used for radar recognition is contained in the set of received radar signals. However, most often for target recognition certain measured target features are used, which are compared in accordance with the recognition algorithms with known (reference) features.

The choice of recognition features is usually made heuristically. This set of parameters does not always allow providing the required quality of recognition. The synthesized algorithms work unstable or require unreasonably large computational costs due to a significant increase in the dimensionality of the feature space.

Analysis of known radar recognition algorithms of extended targets shows that they were developed under significant constraints.

At present, the tasks of point targets radar surveillance are most fully solved. The tasks of processing signals reflected from bodies of complex shape, given the difficulties of their formulation and solution are not fully explored.

It is promising to consider a set of radar surveillance tasks and the criteria used in them as a multicriteria task, the solution of which is associated with vector optimization of the location system as a whole.

Keywords: *radar systems, radar recognition, radar recognition algorithms, resolution.*