

# 高分辨雷达目标识别系统技术研究

马 林

(南京电子技术研究所,江苏南京 210013)

**摘 要:** 高分辨雷达可以获得目标更多的散射信息,为目标识别提供了可能.本文在对高分辨目标识别系统研究的基础上,介绍了系统设计和试验研究,包括识别算法、应用研究技术,通过验证试验,证明该系统可以实时在线完成对空中目标的识别分类.

**关键词:** 高分辨距离像; 目标识别系统; 实时处理

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2633-06

## High Resolution Radar Recognition System Research

MA Lin

(Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

**Abstract:** HRRP reflects structure characters of the target, which are valuable for automatic target recognition. In this paper, upon key techniques of ATR for high resolution radar, we research and develop a whole set of real time HRRP ATR system for aircraft, including the ATR algorithms, hardware, target information display technique and radar system integration. The system is aimed at practicality of RATR and proven working well during the practice online radar experiments.

**Key words:** high resolution range profile; recognition system; real time process

### 1 引言

随着现代军事电子技术的发展,不仅要求雷达能完成目标的检测(位置参数、运动参数等),还迫切希望得到更多的目标特征信息.随着科技的飞速发展与高分辨率雷达技术逐渐成熟,获取目标的特征信息成为可能,这为雷达自动目标识别(Automatic Target Recognition,简称 ATR)技术的发展提供了强有力的技术支持,使这一领域逐渐成为近年来国际、国内的一个研究热点.

对于空中目标,根据利用的信号形式不同,基于高分辨率雷达体制的 ATR 技术大致可分为两类:第一类是雷达目标逆合成孔径雷达(ISAR)图像;第二类是利用目标高分辨距离像(HRRP),或称一维距离像,或一维高分辨距离像.雷达照射目标时,当雷达的距离分辨单元远小于目标的径向尺寸时,目标连续占据多个距离单元,形成一幅在雷达视线(LOS)距离上投影的具有高低起伏特点的目标幅度图像,称为目标一维距离像.目标的一维距离像揭示了目标沿视线方向散射强度的分布,反映了目标散射特征信息,是一种较好的目标识别特征.本文重点研究基于一维高分辨距离像的识别技术.

由于雷达目标识别是一集传感器、目标、环境和数

据处理技术为一体的复杂系统工程,虽然在过去的几十年间,雷达目标识别积累了一大批有价值的理论与技术成果<sup>[1~5]</sup>,但是迄今为止,雷达目标识别技术的研究迫切需要实际数据对各种算法进行验证和完善,尤其是模板库、模型库的建立更需要大量实测数据的支撑.

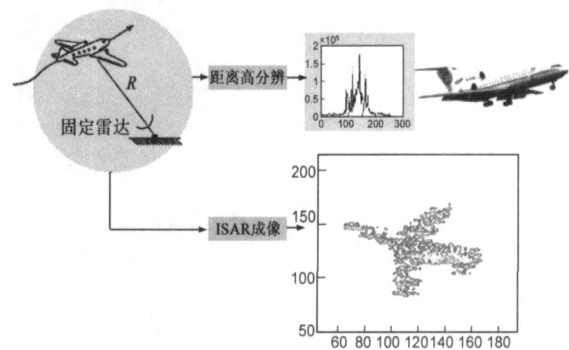


图1 高分辨成像示意图

为突破识别技术的应用瓶颈,系统研究通过建立宽带试验平台,大量录取多种飞机的宽带实测数据,在研究目标识别算法并进行验证的基础上,实现了对空中目标的在线实时识别.

本文在对高分辨识别技术进行概述的基础上,重点介绍了系统研究工作.第二节介绍了宽带试验平台

以及目标识别系统,第三节重点介绍了三种识别方法,第四节对识别系统的硬件和软件进行了介绍,并给出实测数据处理结果,第五节对高分辨识别技术进行了总结和展望。

## 2 雷达和识别系统概述

为了对识别能力进行验证,系统研究建立了机带式雷达目标识别试验平台,雷达工作在 X 波段,最大带宽达到 1G,最大作用距离 150 公里(1m<sup>2</sup> 的目标)。

试验系统工作时,在电扫范围内自动搜索、截获、跟踪目标,在稳定跟踪的情况下,启动宽带测量,雷达控制计算机发出控制命令,根据工作方式的不同,自动对目标交替进行窄带跟踪和宽带测量。

射频的宽带测量信息经去斜率混频成中频信号,再经中频采样后,数据送采集系统及数据处理工作站,数据处理工作站实时进行脉压处理,给出跟踪目标的宽带距离-维像,识别系统基于给出的一维像进行后续的处理。

目前的识别多是通过数据记录设备录取数据,事后进行识别处理。本系统的试验平台充分考虑了实时识别的需求,预留了识别终端的接口,可以在识别算法验证完善后,直接通过识别终端进行实时识别。

实时系统需要考虑的问题不仅是算法的计算效率,还包括对数据的自动选择,姿态角的估计,模板库的选择、识别方法的选择、识别结果的有效输出等技术要求。框图如图 2 所示。

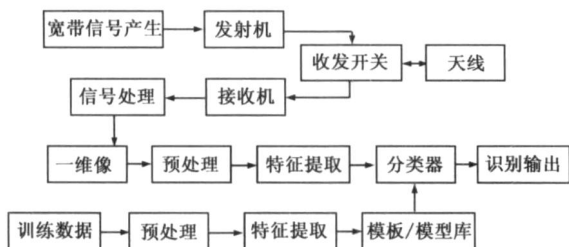


图2 雷达和目标识别系统框图

## 3 高分辨识别技术

### 3.1 目标识别算法

在高分辨雷达目标识别中,一维高分辨距离像是一种比较容易获得的目标特征,它能够反映目标散射结构沿雷达视线的分布情况,不同目标的距离像有差别,同一目标的距离像有一定的稳定性,而且利用单次距离像回波就可以进行识别。然而,距离像作为识别特征存在幅度敏感性、方位敏感性和平移敏感性<sup>[3]</sup>。

(1) 幅度敏感性:由于目标位置、雷达发射功率、接收增益等测量条件会发生变化,造成距离像幅度的敏感性。通常可以采用能量归一化方法对 HRRP 幅度进行

处理。

(2) 方位敏感性:由于单个距离单元的回波是其中所有散射点回波的矢量和,因此,仅毫米级的散射点位移就会引起其回波相位的明显变化,从而距离单元的回波幅度随目标方位角的微小变化起伏剧烈。针对 HRRP 的方位敏感性,可以采用距离像平均、方位约束(分角域)以及对距离像进行幂变换预处理等方法改善其对识别结果的不利影响。

(3) 平移敏感性:窄带跟踪加距离开窗的雷达工作方式造成目标 HRRP 在距离窗内的位置不定,也就是所谓的平移敏感性。克服平移敏感性主要有两类方法:提取距离像的频域或双谱域等平移不变特征作为模板和采用滑动相关(也称作最大相关系数)模板匹配法进行目标识别。提取平移不变特征后,可以用多种模式识别分类器进行分类判决。但这些平移不变特征或者损失了反映目标形状信息的特征,或者维数过大,给识别带来困难。

在目标识别算法中,特征提取和分类器的建立是两个最重要的关键技术。

HRRP 的特征提取方法可以分为两大类:一类是距离像域的特征提取,另一类是变换域的特征提取。

距离像域的特征提取的典型代表是直接利用距离像进行目标识别。1993 年, Li 和 Yang 阐述了直接将距离像作为特征矢量的可行性<sup>[4]</sup>,提出了基于匹配度的飞机目标识别方法。1995 年, Zyweck 和 Bogner 研究了用非相干平均距离像作为模板识别商用飞机的基本方法<sup>[5]</sup>。

基于变换域的特征提取包括:(1) 一维散射中心特征提取<sup>[7]</sup>,该方法以目标散射中心模型为依据,旨在提取目标一维散射中心的位置和(或)幅度等信息作为特征矢量进行雷达目标识别,该方法的关键在于模型的有效性、可靠性和精确性。(2) 平移不变特征提取<sup>[8]</sup>,包括傅立叶变换和高阶谱特征的提取。1) 傅立叶变换:一个时域信号经过傅立叶变换再取模后,具有平移不变性,因此对时域一维像进行傅立叶变换后作取模运算,可以得到距离像的平移不变特征。但是它只利用了距离像频谱的幅度信息,丢失了所有的相位信息,在一定程度上会影响识别效果。2) 高阶谱特征:高阶谱(特别是双谱)不仅具有平移不变性,还能够保留除线性相移之外的全部相位信息,并具有抑制对称概率分布的噪声和干扰的性质,为距离像特征提取提供了一种新方法。(3) 姿态不敏感特征提取,主要有 Mellin 变换和基于准则函数的特征提取。1) Mellin 变换:距离像随目标姿态角的变化,在一定的范围内会表现出尺度伸缩特性,利用 Mellin 变换模值的尺度不变性可以提取姿态不敏感特征。2) 基于准则函数的特征提取是根据任务事先

有针对性地确定某个准则函数,然后以此为依据实现线性或非线性的特征提取.主分量分析(PCA)和线性 Fisher 判别分析(LDA)是两种较为常用的特征提取和维数压缩方法,已被广泛应用于模式识别领域.

此外,特征提取方法还包括时频特征和极化特征提取.时频分析可以同时揭示时域和频域及其相互关系,因而较一维像有更为丰富的识别信息量,但由于从一维变换到二维,数据量急剧增加,需要进行降维处理.极化特征理论上是很好的识别特征,但是极化特征需要雷达本身增加多极化设备,并且极化信息对目标姿态变化非常敏感,也限制了极化特征的实际应用.

常用的雷达 HRRP 识别算法有如下几种:

(1) 滑动相关匹配法(MCC).以 HRRP 为特征,通过滑动相关的方法克服了距离像的平移敏感性,以滑动相关系数作为匹配准则,其实质是一种模板匹配法.简单直接,但推广能力较差.

(2) 基于 HRRP 统计特性的分类器.如假设每个距离单元数据服从相互独立的 Gaussian 分布的自适应高斯分类器(AGC),基于 Gamma-Gaussian 混合统计模型假设的 Bayes 分类器.

(3) 核函数类分类器.早期最有代表性的是径向基函数(RBF)网络分类器;90年代初发展起来的支撑向量机(SVM)成为近年来机器学习领域的研究热点,在雷达目标识别中也有成功的应用,HRRP 别中核函数优化问题也已有大量研究;另外一种核函数方法是相关向量机(RVM)分类器.

对雷达 HRRP 识别问题,在设计识别器时要考虑到识别性能、推广能力和识别运算复杂度.通过大量仿真试验,综合识别效果和工程实现的可行性,我们的目标识别系统选择了三种方法:滑动相关匹配法、支撑向量机和基于概率统计模型的目标识别算法.

### 3.2 滑动相关匹配法

滑动相关匹配法目标识别的过程为:根据信噪比等选择测试样本,估计测试样本对应的目标姿态角,并用来进行方位约束,选择一部分训练样本参与识别.测试样本与训练样本经过一定的预处理后,通过滑动相关匹配过程,判别目标类型.

### 3.3 滑动相关匹配法

滑动相关匹配法目标识别的过程为:根据信噪比等选择测试样本,估计测试样本对应的目标姿态角,并用来进行方位约束,选择一部分训练样本参与识别.测试样本与训练样本经过一定的预处理后,通过滑动相关匹配过程,判别目标类型.

要进行模板匹配法目标识别,首先需要选取训练样本,建立模板库.选取训练样本的常用方法有选取全部

样本的方法和通过聚类产生聚类中心等方法.对于距离像来说,若以全部样本作为训练数据,不仅会增加模板库的冗余度,而且会使得模板库的规模过于庞大,这对于目标识别的实时性是很不利的.由于距离像有平移问题,聚类方法不能直接对没有对齐的距离像进行处理.因此,需要研究适合距离像特性的模板库建立方法.

本系统根据距离像的特点,依据姿态角、样本相关系数等准则选取训练样本,建立或更新模板库.

滑动相关匹配识别方法通过计算两个距离像的滑动相关系数,定义其最大值为两个距离像之间的匹配度<sup>[6]</sup>,以匹配度作为模板匹配准则进行分类判决.匹配度又可以分为以复距离像为特征的相干匹配度和以距离像的幅值为特征的非相干匹配度两种,非相干方法对方位角估计不敏感,对频率变化不敏感,而相干方法对加性噪声有较大容限,同时匹配目标之间和不匹配目标之间的非相干匹配度差异较小,相干匹配度差异较大,即根据相干匹配度进行的识别可信度较高,但要求方位角间隔较小.总之,两种匹配度对识别各有优缺点.不过由于根据相干匹配度进行识别时,要求模板库内训练样本的姿态角间隔较小,这就会大大增加模板库的存储量,不利于目标识别的工程实现.因此,选用非相干匹配度作为分类判决依据.

类判决依据.

算法中的一些参数如下:

平均距离像个数:10 - 20个

模板库角域范围:0.5 - 1.5度

信噪比门限:20dB - 25dB

距离像相关系数门限:0.8 - 0.9

### 3.4 支撑向量机(SVM)

支撑向量机(SVM)是近年来新兴的模式识别方法,在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出了突出的优点.支撑向量机在设计中采用了统计学习理论中的结构风险准则,使得学习机不会陷入过拟合,具有良好的推广能力,同时支撑向量机是一种理论上的稀疏学习机,这使得 SVM 可以具备良好的工程实时应用背景.

在进行实时空中目标识别时,基于 SVM 的识别策略在特征提取时应用了“能量聚束”的特征选取策略.在处理平移敏感时,经典的方法是通过特征提取以避免这一问题.特征提取方法在克服平移敏感、控制维数容量方面均体现了较好的优势,然而特征提取算法对原信号一般是非可重构的,同时为了控制维数容量还采用特征压缩技术,这就有可能损失原有 HRRP 的信息;另一种解决平移敏感的策略是“能量聚束”,即设计合理的标准函数,使 HRRP 中目标散射能量的区域聚集于制定的距离门内.“能量聚束”策略的应用,可以保证

在不损失目标 HRRP 的任何信息下进行识别,然而如何选取恰当的“能量聚束”函数,以获得较高的一维像聚束效果将决定着分类器的辨识性能。

在本识别系统中,采用的聚束函数为

$$f(x) = \begin{cases} \text{sinc}(\frac{x-b}{a}) & x \in [m, n] \\ 0 & x \text{ others} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $b$  为聚束中心,  $a$  为聚束尺度,  $m, n$  为指定的聚束单元。

### 3.5 基于概率统计模型的目标识别算法

在模式识别研究领域,概率统计模型由于其较好的噪声和环境鲁棒性,已经被证明是一种非常成功的模型,而且概率统计模型具有较完善的理论支持,同时复杂度低,具有高效的训练算法,特别是它能够使用较少的模型参数描述大量数据的分布,因而在模式识别任务中的成为主流模型,并且在实际应用中获得了很大的成功。基于概率统计模型的目标识别算法在训练阶段通过对大量训练数据进行统计建模,使目标数学模型尽可能地接近目标特征真实的概率分布,因而具有较好的识别性能和推广性。

相对于散射中心方法和双谱方法,功率谱参数提取方法简单、快速,非常适于工程实现的,但功率谱由于丢失了一维距离像的相位信息,造成了各类目标特征的趋同,因而若直接使用功率谱特征进行目标识别,识别性能很难得到保证,而且,功率谱特征往往具有较高的维数(通常是一维像长度的二分之一),显然,识别过程中较大的计算量和存储量对实际工程应用是极其不利的。因而,针对这一问题应用基于核(kernel)方法的广义判别分析方法(GDA)对特征进行非线性变换,使经过核映射后的特征在同类模式间的距离减少,而异类特征模式之间的距离增大,从而增加目标特征的可分性,并使变换后的特征维数明显减少,并且提高识别性能。

在识别算法方面,所采用的基于概率统计模型的目标识别方法的理论基础来源于简单的贝叶斯定理,因此,统计识别的关键在于确定各类别的类条件概率密度,而目标特征空间的分布是比较复杂的,其分布形式也不是固定的。因此我们引入的高斯混合模型(GMM)来估计目标的特征参数的概率密度函数, GMM 通过  $M$  个不同均值、方差的高斯分布的加权组合来拟合一个任意分布的,很适合用来描述雷达目标特征参数的空间任意分布状况。一个  $M$  个混合度的 GMM 有  $M$  个高斯分布,每个高斯分布的概率密度函数由均值  $\mu_i$ 、方差矩阵  $\Sigma_i$  及其权重  $\alpha_i$  描述,其中  $\mu_i$  是  $D$  维矢量,  $\Sigma_i$  为  $D \times D$  维矩阵,满足  $\sum_{i=1}^M \alpha_i = 1$ , 因此特征矢量  $x$  的概率密度函数可以表示为:

$$p(x) = \prod_{i=1}^M \alpha_i N(x; \mu_i, \Sigma_i) \quad (2)$$

其中  $N(x; \mu_i, \Sigma_i)$  为标准多维变量的高斯分布:

$$N(x; \mu_i, \Sigma_i) = \frac{1}{(2\pi)^{D/2} |\Sigma_i|^{1/2}} \cdot \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - \mu_i)^T \Sigma_i^{-1}(x - \mu_i)\right\} \quad (3)$$

在训练阶段通过 EM 算法获得 GMM 模型参数  $(\mu_i, \Sigma_i)$ 。识别阶段,对待识别数据进行参数提取,估计姿态角,并将其输入至各类目标相应角域的高斯混合模型中,分别计算其计算测试数据在各类目标模型下的概率评分,输出该数据对每个目标模型的匹配似然度,并进行评分归整,最后挑选似然度最大的模型编号输出相应识别目标。

## 4 目标识别系统

### 4.1 实时目标识别算法的硬件实现

实时目标识别是检验目标识别算法的最直接的方式,也是目标识别走向实际工程应用的必经途径,在研究目标识别理论算法的同时也考虑了相应的算法的硬件实现。利用已经获得的试验数据,将训练好的模型参数和识别算法移植到 PowerPC 信号处理板上,训练完毕的目标数学模型参数及其识别算法程序存放在信号处理板上的 FLASH 中供实时识别时计算使用。在实际使用中,从雷达信号处理机获得的中频信号通过以太网实时传输到目标识别有 4 个 PowerPC 处理器的信号处理板上,其中 CPU1 负责接收来自雷达信号处理机的数据(包括宽窄带信息)和协调其余处理器的并行处理任务,利用 CPU2、CPU3、CPU4 对数据进行并行处理以加快处理速度,最终的识别信息通过以太网发回识别信息显示终端,识别实时处理硬件框图如图 3 所示。

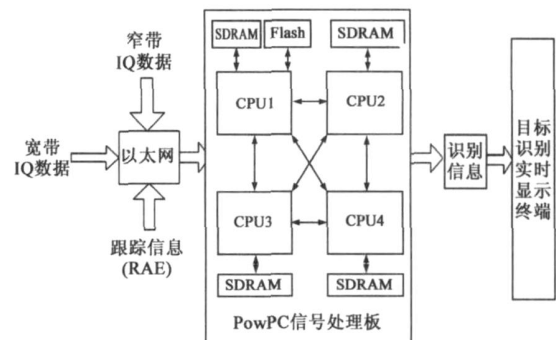


图3 实时系统硬件框图

### 4.2 软件部分

在利用 HRRP 进行空中目标识别时,宽带一维像的姿态敏感、幅度敏感和平移敏感严重制约着识别性能,必须采用合理的策略解决这些问题。

图 4 给出了实时识别系统中综合利用雷达宽窄带信息进行空中目标识别的软件算法流程图,如图所示,识别系统综合利用了雷达的宽窄带信息对目标进行分类辨识.对空中目标进行分类辨识时,首先对目标的 HRRP 进行归一化处理,然后选择合理的特征(包括原始特征、谱域特征、结构特征等)对目标进行描述,最后采用高性能分类器对目标特征进行比对鉴别,综合判断给出辨识结果及置信度.

需要说明的是在识别系统在建立目标的模板/模型库时,是以不同的姿态角域对目标进行刻画的;在进行实时处理时,系统首先根据目标的飞行航迹计算出当前姿态角,然后将目标 HRRP 进行特征选择并送往对应角域的模板/模型库进行比对鉴别.

识别系统中显示界面部分主要包括:将识别的最终结果(识别出的机型、识别混淆矩阵、识别评分等)、和目标有关的雷达测量参数(距离、方位、俯仰等)、成像结果(HRRP, ISAR)等.图 5 给出了目标识别系统的显示界面.

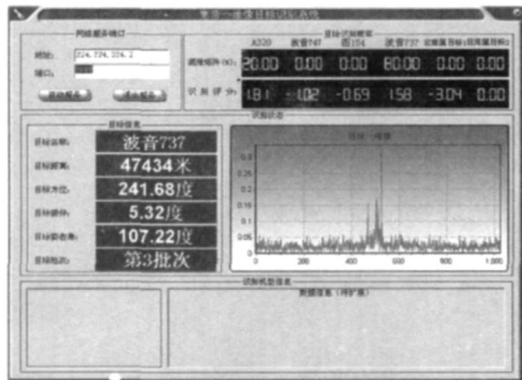


图5 目标识别系统显示界面

### 4.3 试验结果

通过试验,记录了大量空中目标的实测数据,其中民用飞机机型包括波音 737、空客 A320 等飞机,通过本识别系统的三种方法的识别处理,均取得了较好的识别效果(见表 1).

表 1 高分辨雷达空中目标识别结果

识别算法	库属目标识别				非库属目标拒判	
	波音 737	A320	波音 747	图 154	未知机型 1	未知机型 2
基于 MCC 的识别算法	75.48 %	73.03 %	79.14 %	78.11 %	85.57 %	87.41 %
基于 SVM 的识别算法	85.1 %	84.9 %	90.2 %	88.7 %	92.3 %	92.6 %
基于概率统计模型的识别算法	82.1 %	86.1 %	85.5 %	83.4 %	91.1 %	89.6 %

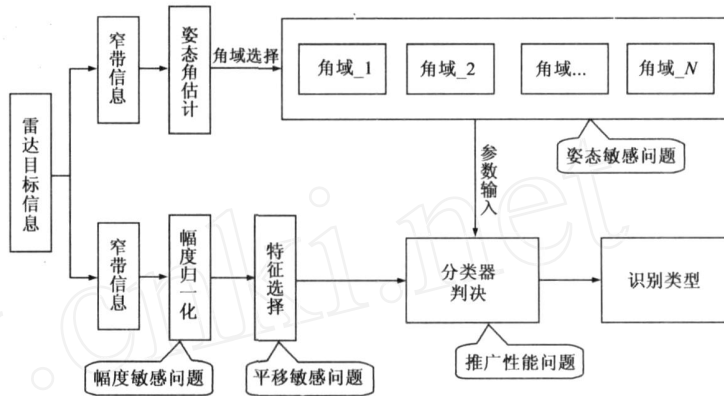


图4 高分辨雷达空中目标识别算法流程

另外,对三种方法在计算量、拒识等方面进行了比较,结果见表 2.在实际应用中,可以根据应用背景和硬件条件,选择合适的方法.

表 2 三种方法的比较

识别方法	识别性能	拒识性能	新目标在线建库/模
MCC	一般	一般	容易
SVM	好	好	难,需要对所有目标重新进行学习、训练
统计模型	较好	好	容易,只需对新目标进行训练建模

### 5 总结和展望

近年来,在目标电磁散射特性研究的基础上,研究了多种目标识别算法,通过建立宽带试验平台,研制了目标识别终端,通过大量实测数据的积累和验证,实现了对空中目标的分类识别,取得了较好的识别效果.

雷达面临的环境越来越复杂,高分辨雷达目标识别技术近年来取得了较多的研究成果,但是依然存在许多理论和工程问题有待解决,主要包括:

#### (1) 宽窄带综合识别

由于宽带作用距离较窄带小,以及雷达资源的限制,在实际应用中,需要进行宽窄带综合识别,例如,可利用目标的速度、RCS、多普勒特性、低分辨起伏特征等,对目标进行粗分类,然后再利用宽带进行精细识别.但是宽窄带综合识别分类策略和流程的建立,需要根据不同的应用环境和识别对象进行设计.

#### (2) 融合识别(多特征、多传感器、多平台等)

由于各种对抗技术的发展,特别是隐身技术、干扰技术等的发展,使得单一特征的识别变得越来越困难,需要对多特征进行融合识别.同时,目标 HRRP 实际上只是从一个侧面反映了目标的特性,要从根本上解决雷达目标识别问题,特别当目标类别数较多、识别环境较为复杂时,需要多种手段综合利用,包括多传感器、多平台的协同工作和融合识别.

#### 参考文献:

[1] August W Rihaczek, Stephen J Hershkowitz. Theory and Prac-

- tice of Radar Target Identification[M]. Boston, London: Artech House, 2000.
- [2] Williams R, Westerkamp J. Automatic target recognition of time critical moving targets using 1 D high range resolution (HRR) radar[J]. IEEE AES Magazine, 2000, 15(4): 37 - 43.
- [3] Zyweck A, Bogner R E. Radar classification of commercial aircraft[J]. IEEE Trans A E S 1996, 32(2): 598 - 606.
- [4] Hsueh-Jyh Li, Sheng-Hui Yang. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1993, 41(3): 261 - 268.
- [5] Anthony Zyweck, Robert E Bogner. Coherent averaging of range profiles[J]. IEEE International Radar Conference, 1995. 457 - 461.
- [6] Hsueh-Jyh Li, Yung-Deh Wang, Long-Huai Wang. Matching score properties between range profiles of high-resolution radar targets[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1996. 44(4): 444 - 452.
- [7] K T Kim, D K Seo, H T Kim. Radar target identification using one-dimensional scattering centers[J]. IEE Proceedings Radar, Sonar Navigation, 2001, 148(5): 285 - 296.
- [8] J Portegies Awart, R van der Heiden, S Gelsema, F Groen. Fast translation invariant classification of HRR range profiles in a zero phase representation[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2003, 150(6): 411 - 418

#### 作者简介:



马林男, 1965年10月生, 1990年毕业于南京电子工程研究中心通信与电子系统专业, 硕士。现任南京电子技术研究所副所长, 中国电子学会会士, 研究员级高级工程师。获国防科学技术进步一等奖、国防科学技术进步二等奖、国防科学技术进步三等奖多次, 获江苏省有突出贡献中青年专家、载人航天工程一等功荣誉证书、“神舟”六号载人航天飞行任务先进个人等多项荣誉, 为我国在大型测量雷达技术的研究与应用作出了突出贡献, 具有很深的理论造诣和丰富的实践经验。

E-mail: malin01@yahoo.cn