

智能化武器系统发展的关键技术 ——雷达自动目标识别技术

Radar Target Recognition: A Key Technology for Development of Intelligent Weapons

庄钊文 / ZHUANG Zhao-wen, 黎 湘 / LI Xiang, 刘永祥 / LIU Yong-xiang

国防科学技术大学电子科学与工程学院, 长沙 410073

School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

[摘 要] 雷达目标识别作为智能化武器发展的关键技术, 在未来信息化条件下一体化联合作战中发挥着极为重要的作用。简要回顾了雷达目标识别技术的发展, 重点介绍了在雷达目标识别方面取得的技术进展和主要成果, 并概括了该领域的发展趋势。

[关键词] 雷达目标识别, 目标特性, 特征提取

[中图分类号] TN953.TJ43

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2005)08-0020-04

Abstract: As a key technology for development of intelligent weapon systems, radar target recognition technology would play an important role in the joint informed war in future. The technical development of radar target recognition is reviewed firstly in this paper, then some technical advancement and achievements related to radar target recognition are presented in details, finally, the technical trends in the radar target recognition are summarized.

Key Words: radar target recognition, characteristic of target, feature extraction

CLC Numbers: TN953.TJ43

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)08-0020-04

1 引言

现代战争是以信息技术为先导的高技术战争, 掌握制信息权、联合作战、精确打击是其标志性特点。在现代战争条件下, 高技术武器的信息化、智能化、隐身化发展趋势对自动目标识别的需求是显而易见的。对来袭目标的有效探测和预警, 对战场目标的高清晰侦查和监视, 精确制导武器的高精度寻的等等, 都需要自动目标识别理论和技术作为支撑, 这奠定了该技术在军事高技术领域中的重要地位。

雷达以其全天时、全天候、作用距离远等技术优势, 成为主要的战场探测系统。雷达自动目标识别就是根据目标和环境的雷达回波信号, 揭示电磁散射机理,

提取目标特征, 实现目标类型和属性的自动判定。可以说, 雷达目标识别是集传感器、目标、环境和信号处理技术为一体的复杂系统工程。雷达目标识别技术的研究已有数十年的历史, 积累了一大批卓有理论意义与技术成果^[1-5], 至今仍然是学术界、工程界的研究热点之一。该研究方向不仅有重大的理论和学术意义, 而且具有广阔的应用前景, 特别是巨大的军事应用价值, 美、俄等军事强国均把它作为发展未来智能化武器系统的重点和应首先突破的关键技术。

2 雷达目标识别技术的发展回顾

雷达目标识别最早可追溯到 1934 年。

当时, 前苏联列宁格勒电子物理研究所的工程师 B. K. Shembel 在连续波雷达“Rapid”的开发过程中, 通过分析雷达反射回波产生的音频信息实现了目标识别^[2]。随着脉冲压缩和线性调频雷达的出现, 雷达的距离分辨率有了很大提高, 使得通过分析距离压缩信号的结构来识别目标的特征和类型成为可能, 同样, 雷达频率分辨率的提高使得估计目标运动速度、旋转速度、飞机发动机螺旋桨或涡轮叶片数等参数得以实现, 除了频率、幅度、相位这些回波参数外, 极化参数也可用于提高雷达识别系统的信息容量^[3]。

从 20 世纪 50 年代开始, 雷达目标识别的应用越来越普遍, 例如 1955 年法国生

收稿日期: 2005-07-06

基金项目: 国家杰出青年基金项目 (60025102), 国家基础研究发展计划项目, 国家自然科学基金面上项目 (60402032)

作者简介: 庄钊文, 男, 长沙市德雅村国防科学技术大学, 教授, 主要从事信号处理、自动目标识别、模糊技术等领域的研究工作;

E-mail: zwzhuang@nudt.edu.cn

产的RATAC雷达和RASIT雷达可利用多普勒音频信号识别目标类型^[2]。20世纪50年代末,美国用AN/FPS-16跟踪前苏联的卫星Sputnik II, D K Barton根据回波信号的起伏规律,推断卫星上带有角反射器^[6]。20世纪60年代,美国AN/FPS-85相控阵雷达利用极化信息判断出美“探索者-45”气象卫星有两块太阳能电池板没有完全打开^[7]。

在最近的几次局部战争中,导弹防御系统目标识别能力和对地侦察系统目标识别能力得到高度重视。美国的AN/MPQ-53爱国者制导雷达能够识别气动型和弹道型目标,并可区分目标和诱饵,确定目标拦截的优先级^[8]。美国弹道导弹防御系统中的X波段宽带雷达,距离分辨可达到15~20 cm,在目标识别中发挥着关键的作用,可以识别目标表面材料的电磁参数、密度、结构与滚动速率,甚至能确定弹头的质量。在多次综合飞行试验中,X波段雷达能够在多个假目标和诱饵中精确地识别、跟踪靶弹^[9]。美国的“长曲棍球”雷达侦察卫星,成像分辨率达1 m,可监视识别舰船、装甲车辆、机动洲际导弹,还可揭露伪装和假目标,能透视干涉、浅海等数米以下的目标^[10]。

3 雷达目标识别技术的进展和成果

3.1 雷达目标电磁散射建模建库方面

雷达目标电磁散射建模建库研究主要是开展目标电磁散射模型及机理分析、电磁数据库和散射实验测量等工作,它是雷达目标识别的前提和基础。在建模方面,我们主要开展了基于时域有限差分(FDTD)的宽带/超宽带电磁散射建模研究,提出用于FDTD计算的复杂目标通用网格剖分方法,可将任意目标的三角面元剖分数据转换成FDTD计算所需要的网格



图1 网络并行电磁散射计算系统

数据,建立了多种基于FDTD的目标电磁散射模型,并建立了16台高速计算机组成的网络并行计算系统(见图1)。系统采用频域并行快速算法,包括快速自动配对技术、矩阵元素快速计算技术、快速多极子技术和网络并行计算技术等,设计和开发了具有自主知识产权的电磁散射分析软件,为目标频域宽带电磁散射理论建模打下了良好的基础。

在电磁散射特性数据库方面,实现了目标各类信息的入库、查询、维护、报表打印以及标准文件格式的输入与输出功能(见图2)。其中,数据库中的目标电磁散射特性包括幅度特性、频率特性、极化特性、一维图像特性以及二维图像特性等,已经开发的数据管理分系统能提供集成、可视化的信息表示功能。

通过对电磁散射测量系统扩充、改造,将4个单极化馈源组成一个馈源阵,实现了两个双极化馈源的测量功能,形成了X波段宽带极化散射矩阵和8 mm极化矩阵的测量能力。研制多种目标模型以及椭球体、双弧柱、锥球体等标准体模型(见图3),并对模型进行了宽带极化散射矩阵测量。

3.2 基于极点与散射中心的雷达目标识别

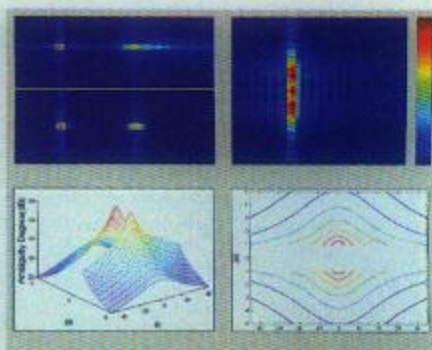


图2 电磁散射特性测量数据库

方面

目标极点和散射中心是描述谐振区、光学区雷达目标特性的主要手段,是宽带/超宽带雷达目标特性分析、特征提取与识别的重要途径。在谐振区雷达目标识别方面,提出了面向任意形状导体、介质及涂敷介质目标的极点求解途径,并研究典型简单目标、组合目标以及表面不连续目标的极点分布特点,为隐身、非隐身雷达目标的精确识别奠定了基础。在国内首次高精度获取了超宽带雷达作用下的典型目标散射场,并通过测量数据提取了目标的极点,从实验角度验证了极点的姿态不变性,为基于极点特征的雷达目标识别研究奠定了基础。

在光学区雷达目标识别方面,近年来,我们对波导、球、平板、二面角等4种典型结构的高频宽带散射特性和雷达图像特征进行了分析,初步建立了滑动型散射中心模型理论框架,并以空域点展布函数和谐域等效散焦效应作为主要研究手段,分析这几种结构的模型特点和图像域特征。该模型能概括单、双曲面等一系列常见的目标强散射结构,具有普遍性,研究成果有望实现典型结构的图像辨识、特征提取和图像校正。

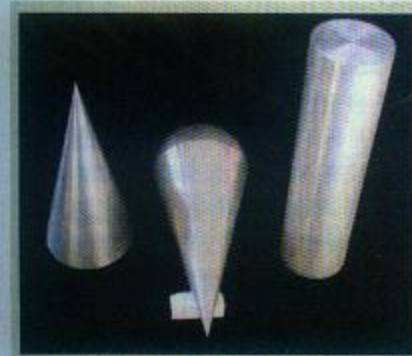


图3 典型标准体目标模型图



图4 超宽带雷达测量系统及目标模型

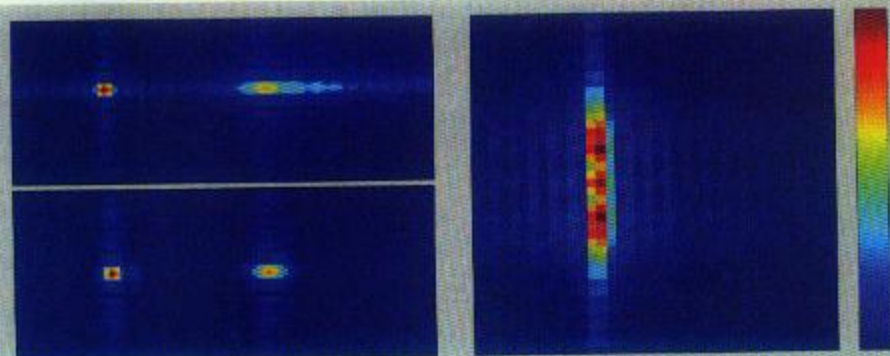


图5 腔体结构图像校正效果图及滑动型结构雷达图像特征

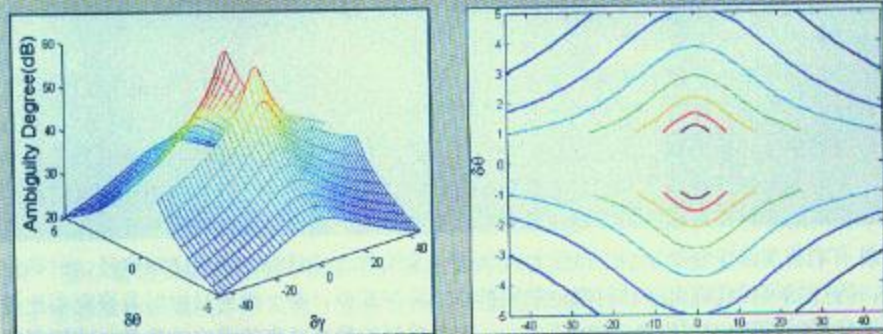


图6 极化敏感阵列信号模糊函数图

3.3 极化域雷达目标识别方面

雷达目标的极化特性是继能量、频率、相位特性之后,成为雷达信息处理的重要对象,在诸如抗杂波干扰、反隐身等方面显示出了巨大潜力,开展极化域自动目标识别的探索研究工作,已成为发展新一代雷达目标识别技术的紧迫需求。

目前,我们已经建立了瞬态极化统计理论的基础框架,揭示出电磁波和雷达目标极化散射的动态统计规律,为雷达目标极化散射特性的刻画、雷达目标电磁散射的极化特性分析、特征提取等研究提供理论基础^[1]。

围绕极化敏感阵列的滤波,分析了该阵列具有的极化域-空域联合滤波能力,提出了极化滤波器性能的度量方法和评价

指标,丰富了阵列信号处理理论,为阵列的设计提供了理论指导。极化敏感阵列信号分辨理论揭示了极化信息改善空间角分辨力的内在规律,为空间电磁信号的分辨问题提供预测,为空间目标超分辨、真假目标鉴别与识别提供理论支撑。

3.4 目标融合识别与试验评估方面

陆、海、空、天多传感器高密度使用已成为现代战争的显著特征,多传感器信息的融合处理已成为军用信息领域的重要研究方向。另一方面,从雷达目标识别技术的实用性、系统性角度考虑,为实现雷达目标识别的有效集成和验证,目标识别系统的集成、试验与评估等技术进展将起到重要的推动作用。

在信息融合目标识别方面,通过借鉴

神经生物学和认知科学的基本理论和研究成果,研究了人脑进行高层信息整合的基本原理,揭示了信息融合的神经生物基础;基于人脑信息整合机制,提出了信息融合的基本准则和数学模型。在应用层面上,基于信号相干补偿思想,研究了雷达波段合成技术,为根据现有技术基础研制出更大带宽的雷达系统提供了技术支撑。基于伪彩色开展多传感器图像融合研究,将人类视觉感受野的数学模型引入图像融合,用不同的颜色表示原图像之间的灰度差异,可以提高融合图像的视觉效果。

为了验证识别算法的有效性,我们构建了多传感器目标识别试验平台,包括中/长波红外传感器、毫米波宽带测量雷达、可见光相机、载车、方舱和等转台设备,以及高速信号处理板、双通道数据采集板、红外/可见光数据采集板和功能软件。该平台预计2005年10月建成,将为雷达目标识别研究提供特性测量数据和理论成果验证平台,并将推进雷达目标识别技术的实用化进程。

作为智能化武器系统研制的重要组成部分,开展目标识别系统仿真研究具有重要的意义。目标识别集成系统就是建立合理的识别流程通用模型,在科学设计体系结构和数据处理流程的基础上,定义算法接口标准、设计仿“Matlab”式的通用目标识别算法集成环境。目标识别集成系统由测试数据库、算法库、流程设定与测试平台、插件管理4个子系统组成,目前已经实现了目标识别算法集成、可视化流程制定、算法模块参数的查看与设定、全流程算法仿真测试与分模块测试、测试结果显示与存储、算法插件扩展等功能。目标识别集成系统产品化后,可为目标识别系统的应用部门提供技术和算法验证方面的有力支撑,缩短目标识别系统与模块的研制周期。

目标识别系统性能评估是检验目标识别系统可行性、稳定性和有效性的重要途径,目前已将目标识别环境、目标识别流程、目标识别结果共同纳入评估框架,建立了较完备的目标识别评估理论体系,提出了基于测度论和模糊数学理论两大类性能评估模型,并进行了仿真实验,为量化评估识别算法提供基础。

另外,在雷达目标识别系统研制方面,要达到实用的程度,识别技术必须与雷达系统的其它功能模块融为一体。因

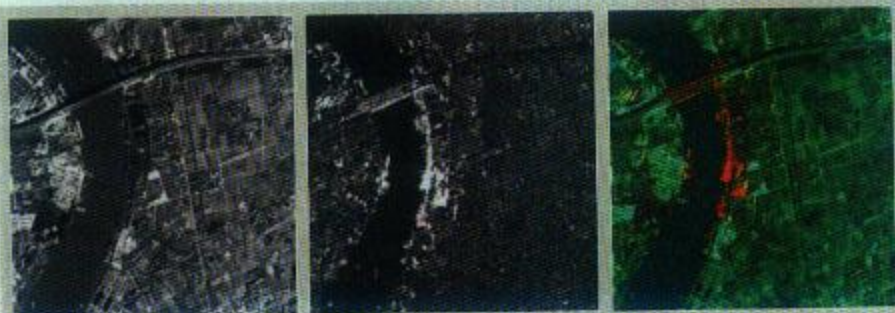


图7 上海市区域的可见光图像、SAR图像和融合图像

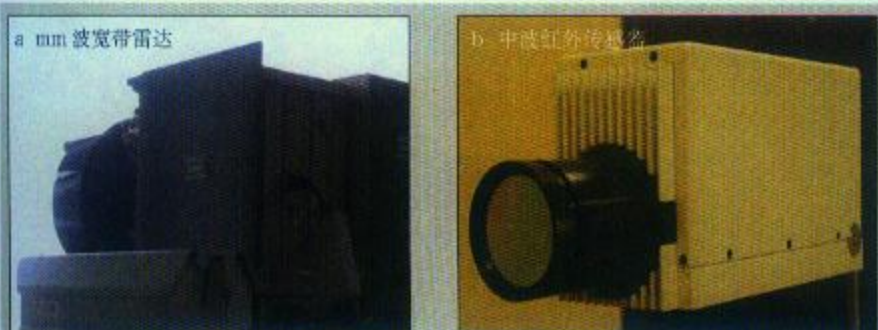


图8 多传感器目标识别试验平台的部分探测设备

此,雷达目标识别系统技术应包括目标雷达特征的分析与提取、稳健的分类识别方法、识别性能的评估以及系统实现必不可少数据库、人机交互、系统管理等内容。在识别系统的设计中,目标识别的框架结构与模块化算法设计,宜采用层次化、模块化的框架结构,即将多类别复杂识别的问题分解成不同层次上对较少类别进行简单识别的问题,使得识别系统在不同层次上可以灵活地采用相应的特征提取与目标识别算法。识别系统在层次化组织的基础上,还将按照功能分解成相对独立的模块,分别提供多种不同算法供系统实现时选择,从而有利于识别系统设计人员针对不同模块进行独立调整和优化,以实现整个自动目标识别系统的最优化设计。

4 雷达目标识别技术的发展趋势

从早期的基于回波起伏和 RCS 特性的识别到当前发展热点的高分辨率成像识别,雷达目标识别经过几十年的发展并逐步形成了一套理论和方法,但在实际应用方面仍面临诸多困难。一方面,目标环境的复杂性降低了已有识别方法的能力,另

一方面,不断涌现的新体制雷达和目标特性要求有与之匹配的识别方法。雷达目标识别技术在战场监视中的迫切需求必将推动该技术迅猛发展。结合雷达技术的发展,从提高目标识别实用性角度看,雷达目标识别技术的发展趋势可归纳为以下 6 个方面。

1) 结合新体制雷达,发展利用新的物理效应的识别技术。近年来,超视距雷达、双多基地雷达、超宽带雷达、低截获概率雷达相继出现和投入使用,研究这些雷达信号与目标作用的物理效应,可望获得更好的目标识别效果。

2) 进一步研究有效识别特征的提取与选择问题,开发稳健的识别算法。

3) 发展雷达与其它传感器的数据融合技术,特别是研究在对抗条件下集成不同传感器的处理理论和方法。

4) 进行广泛的实验检验,开展目标识别数据库技术研究,积累各种目标类型在不同方位角、不同背景下的实验数据,为建立目标共享数据库收集模板数据。

5) 在各种识别方法中,人工神经网络以其智能化的信息处理能力而得到了普

遍认可,很多专家建议未来的目标识别算法应大量地采用神经网络技术。

6) 研究雷达目标识别系统快速设计、评估和仿真技术。

5 结束语

雷达目标识别是集传感器、目标、环境和信号处理技术为一体的复杂系统工程,传统的雷达观念、体系结构不断更新,新兴的需求背景、不断的出现新的信号处理理论都将推动雷达目标识别理论和技术

参考文献(References)

- [1] 郭桂蓉,庄钊文,陈曾平.电磁特征抽取与目标识别[M].长沙:国防科技大学出版社,1996
- [2] Nebabin V G. Methods and techniques of radar recognition[M]. Boston: Artech House, 1997
- [3] 庄钊文,肖顺平,王雪松.雷达极化信息处理及其应用[M].北京:国防工业出版社,1999
- [4] Rihaczek A W, Hershkovitz S J. Theory and practice of radar target identification[M]. Boston: Artech House, 2000
- [5] Shirman Y D. Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Detection and Tracking[M]. Boston: Artech House, 2002
- [6] Barton D K. Sputnik II as observed by C band radar[J]. IRE National Conference, 1959, 7(5): 67~73
- [7] Skolnik M I. Radar Handbook (2nd Edition) [M]. 北京:电子工业出版社,2003
- [8] Lewis G N, Postol T A. Future Challenges to Ballistic Missile Defense[J]. IEEE Spectrum, 1997, (9): 60~68
- [9] Lemnios W Z, Grometstein A. Overview of the Lincoln Laboratory Ballistic Missile Defense Program[J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(1): 9~32
- [10] William P Delaney, William W Ward. Radar Development at Lincoln Laboratory: An Overview of the First Fifty Years [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2000, 12(2): 147~166

(责任编辑 苏青)

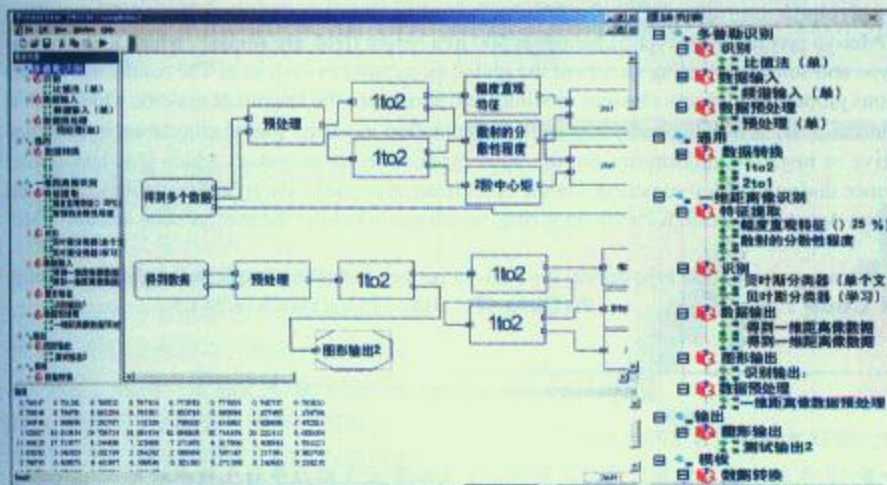


图9 目标识别集成系统的运行界面及算法库内容