

# 电磁特征抽取 与目标识别

国防科技大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁特征抽取与目标识别/郭桂蓉;庄钊文;陈曾平著

—长沙:国防科技大学出版社,1996.3

ISBN 7-81024-363-2/TN·20

I 书名

II 郭桂蓉 庄钊文 陈曾平

III ①电磁特征抽取 ②目标识别

IV TN·957.52

责任编辑:胡见堂 罗 青

责任校对:李 毅

封面设计:陆荣斌

国防科技大学出版社

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

新华书店总店北京发行所经销

湖南大学印刷厂印装

\*

开本:850×1168毫米 1/32 印张:7 字数:176千

1996年3月第1版第1次印刷 印数 1-1000册

\*

ISBN 7-81024-363-2

TN·20 定价:18.00元



## 郭桂蓉简介

**郭桂蓉** 1937年10月生,四川成都人,教授,通信与电子系统学科博士生导师,中国工程院院士,现任国防科技大学校长。1959年毕业于哈尔滨军事工程学院,1960年到1965年赴苏联莫斯科茹科夫斯基空军工程学院留学,获技术科学副博士学位。发表专著、译著、教材14部,学术论文100余篇。多次获得全国科学大会奖、国家科技进步二等奖、部委级科技进步一、二等奖。目前主要从事信号处理、目标识别、统计信息处理及模糊信息处理等领域的科研和教学研究工作。



### 庄钊文简介

庄钊文,1958年6月生,福建泉州人,教授,通信与电子系统学科博士生导师,现任国防科技大学电子工程学院总工,精确制导自动目标识别国家重点实验室副主任。1981年毕业于国防科技大学,1984年于该校电子技术系获硕士学位,1989年于北京理工大学获工学博士学位。发表学术论文50余篇。合作出版专著、教材5部,获国家级、部委级科技进步一、二等奖5项。目前主要从事信号处理、雷达目标识别,模糊信息处理及可靠性工程等领域的研究。



### 陈曾平简介

陈曾平,1967年10月生,福建福清人,副教授,通信与电子系统学科硕士生导师。1987年毕业于国防科技大学,1994年6月于该校电子技术系获博士学位。发表论文20余篇。获国家科技进步二等奖二项,国防科工委科技进步一等奖二项,二等奖二项。目前主要从事信号处理、目标识别及专用处理系统研究等。

## 内 容 简 介

本书重点探讨和论述雷达目标电磁散射特征的描述、抽取与识别的理论及技术。共分七章。研究内容包括:目标的雷达特性,目标结构特征抽取,频域、极化域目标识别技术,非线性目标识别技术,基于结构特征的识别方法,及识别系统硬件、软件环境的开发与实现等。这些内容反映了在目标识别这一方向上,当今国际研究水平和作者近年来的科研成果。书中既有理论分析、算法推导,还有实验研究和实验结果及其相应的图表和数据,内容丰富,论叙清楚,实用性强。

本书适合作为从事信号处理、目标识别科技工作者的参考书,也可作为高等院校研究生相近专业的教学用书和参考书。

# 前 言

雷达目标识别是现代雷达系统发展的重要方向,目标电磁特性的研究,目标特征的提取方法和分类识别技术是其主要的研究内容。随着雷达目标散射特性描述手段的进一步发展以及雷达特性概念的日臻完善,在现代雷达系统中日益重视非座标参数的雷达测量,这种测量与普通的米制测量不同,其目的就是开发雷达自身的自动目标识别功能。近几年来,由于雷达部件、高性能高速度信息处理硬件的发展以及自动匹配判决算法研究的新进展,极大地提高了从工程上解决目标识别问题的现实可能性。自动目标识别(ATR)、自适应、智能化、模糊化、实时信号处理以及对复杂多变电磁环境的高度适应能力的精确制导武器系统,已成为当今世界各国军备发展的重点。我国在电子系统的信息处理,特别是自动识别方面,同美国、日本、欧洲等技术发达国家相比,仍有一定差距。鉴于此,国防科工委和国家科委已制定规划,重点投资,集中人力、物力跟踪赶超世界先进水平,重点发展电子系统中的 ATR 技术和实时信息处理技术,并已列入国家 863 高技术规划项目和国防科技“八·五”规划研究项目。本书阐述的内容主要取材于作者在参加“八·五”国防重大预研项目“空中目标电磁特征的抽取与识别”中的主要研究成果。我们设想,本书的出版能够引起我国学术界对目标识别研究领域的关注,能够让更多的国内学术同行了解、熟悉和掌握目标识别研究中的基本概念、基本理论和基本方法。

全书分三个部分。第一部分(第一章)着重对现有国内外目标识别技术进行归纳和评述;第二部分(含第二、三、四章)重点论述了基于谐振区目标极点特征的识别技术;第三部分(含第五、六、七

章)主要阐述了基于光学区目标散射中心,即目标结构特征的识别技术及其系统实现的软、硬件环境。本书末尾还附有近二百篇有关目标识别的文献资料,这对于那些希望从事目标识别研究的科技工作者来说,无疑是有益的。本书第一章由郭桂蓉教授、庄钊文教授执笔,第二、三章由庄钊文教授执笔,第四、五章由郭桂蓉教授执笔,第六、七章由陈曾平副教授执笔。

本书的出版得到国防科技大学科研部学术著作出版基金的资助,在此谨致谢意。本书的研究内容曾得到北京理工大学柯有安教授的指导和帮助,在此一并表示谢意。

由于时间仓促,水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

1995 年 4 月于长沙

# 目 录

## 第一章 绪 论

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| § 1.1 基于时域响应的目标识别·····         | 2  |
| § 1.2 基于频域响应的目标识别·····         | 6  |
| § 1.3 基于波形综合的目标识别·····         | 9  |
| § 1.4 基于极化特征和非线性散射特性的目标识别····· | 12 |
| § 1.5 雷达目标识别中的模式识别技术·····      | 17 |
| § 1.6 雷达目标识别系统中的数据采集与信号处理····· | 20 |

## 第二章 频域极小极大目标识别

|                        |    |
|------------------------|----|
| § 2.1 多频极小极大方法·····    | 24 |
| § 2.2 频域数据拟合与加权匹配····· | 30 |
| § 2.3 贴适度匹配过程·····     | 33 |
| § 2.4 实验研究·····        | 36 |
| 附录 A·····              | 49 |
| 附录 B·····              | 50 |
| 附录 C·····              | 51 |

## 第三章 极化域目标识别

|                        |    |
|------------------------|----|
| § 3.1 单频多极化幅度响应方程····· | 54 |
| § 3.2 极化域拟合匹配过程·····   | 58 |
| § 3.3 极化域仿真研究及结果·····  | 62 |
| § 3.4 小结·····          | 76 |

## 第四章 非线性目标的识别

|                          |    |
|--------------------------|----|
| § 4.1 非线性散射的结构化逼近模型····· | 78 |
|--------------------------|----|



|                         |    |
|-------------------------|----|
| § 4.2 特征抽取与自动匹配过程 ..... | 82 |
| § 4.3 试验研究 .....        | 87 |

## 第五章 雷达目标结构特征描述

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| § 5.1 引言 .....              | 100 |
| § 5.2 单极化雷达目标结构特征描述 .....   | 102 |
| § 5.3 全极化雷达目标结构特征描述 .....   | 109 |
| § 5.4 全极化雷达目标二维结构特征描述 ..... | 113 |
| § 5.5 实验结果及分析 .....         | 120 |

## 第六章 基于目标结构特征的识别方法

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| § 6.1 引言 .....                 | 147 |
| § 6.2 相关滤波识别方法 .....           | 149 |
| § 6.3 基于目标结构特征的 HMM 识别方法 ..... | 160 |
| § 6.4 模糊极小-极大神经网络识别方法 .....    | 167 |

## 第七章 雷达目标识别系统中的数据采集和信号处理

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| § 7.1 引言 .....              | 175 |
| § 7.2 双通道高速大容量数据采集系统 .....  | 177 |
| § 7.3 模糊模式比较(FPC)开发系统 ..... | 182 |
| § 7.4 神经网络处理器开发系统 .....     | 187 |

## 参考文献

## 第一章 绪 论

雷达目标识别的研究始于 20 世纪 50 年代末期。其时,美国的 D. K. Barton 用 AN/FPS-16 型跟踪雷达详细记录了苏联刚刚发射的第二颗人造卫星 Sputnik I 的回波信号,发现其振幅起伏中有与角反射器相类似的周期分量存在,Barton 当即断言,苏联第二颗人造卫星上带有角反射器,并由此推理出前苏联当时的卫星跟踪网是由第二次世界大战时使用的低威力雷达所组成。Barton 划时代的推断深刻地改变了雷达自身的内涵,标志着雷达测量已由普通的米制测量走向特征测量的新阶段。此后的近 40 年间,目标识别在自己发展的征途中积累了一大批卓有意义的研究成果,已成为当今高技术领域的一个重要学术方向。就它的过去和目前的研究势态看,都预示了这一课题有着不可限量的前景。可以预料,其一旦获得长足的发展,必将对新一代雷达,尤其是新一代智能雷达的理论、体制和技术发生深刻的影响。

今天,目标识别作为雷达新的功能之一已在诸如海情监控系统、弹道导弹防御系统、空中防务系统及地球物理、射电天文、气象预报、埋地物探测等技术领域发挥出很大的威力。

就概念化的意义讲,利用目标的电磁响应来辨识目标的过程涉及了对目标的编码、特征的选择与提取,自动匹配算法的研制等手续,其中尤以目标特征的选择与提取为主要关键环节。这一点是本书所要着力论述的一个方面。目前,有关目标识别的基础理论和可供资用的技术途径种类甚多,其中,广为公认的有:电磁逆散射理论、电磁奇异展开、高距离分辨兼单脉冲技术、目标引擎调制效应、散射截面起伏、合成孔径处理、逆合成孔径处理、极化变换特

性、目标运动轨迹处理以及非线性结效应(METRRA 技术)等等。本章的篇幅不可能面面俱到地对上述技术领域作详细的介绍,而只能就前人研究成果中那些与本书有关联的工作做一扼要的评述。

## § 1.1 基于时域响应的目标识别

70 年代初期,L. Marin 的研究表明了任何良导体目标的电磁转移函数可以看成有限复平面上的亚纯函数。这一结果连同 Mittag-Leffler 定理事实上已成为 Baum 提出的奇异展开法(SEM)的理论柱石。SEM 展示出目标的中、后期瞬态响应可以用一些衰减的正弦振荡之和来逼近,启发人们运用极点的概念来表征目标的电磁转移特性。自 70 年代中期以来,陆续有了一些利用目标的极点特征来辨识目标的报导。其中,如何依据目标的时域瞬态响应来提取目标的极点特征(亦称目标的复谐振频率)直到今天仍然是一个重要的研究论题。1975 年 Blaricum 和 Mittra 首先研究了直接从一组时域数据提取系统极点和留数的方法。这种方法以 Prony 法为基础,经由两次矩阵求逆,一次求解高阶代数方程来获得系统的留数和极点。人们直称这种算法为 Prony 法。此后,又出现了最小二乘方 Prony 法,全最小二乘方 Prony 法,奇值分解 Prony 法,第二 Prony 法等一些提法略有差别的版本。几乎与 Blaricum 同时,Berni 提出了一种利用随机发射信号提取目标极点的统计估值法。他运用模式响应向量的概念,首先建立回波信号的数学模型,然后证明了以噪声空间向量(NSV)为系数的高阶代数方程即是目标的特征方程,求解这一方程可以获得目标的极点集。文中指出,NSV 的获取是通过解算回波信号相关矩阵的特征向量来实现的,而且还建议直接用 NSV 作为目标的分类特征。接着,Blaricum 和 Mittra 撰文披露了 Prony 法实际应用时的三大问题:如何推广到存在多重极点的场合;如何判定目标极点个数;如何减少噪声的

影响。文中对前两个问题的回答是肯定的。就是说,Prony 法不仅适用于单重极点的情况,也可用于多重极点的场合;资料中给出了两种判阶算法:Householder 正交法(HOM)和特征值法(EVM)。其中,HOM 较 EVM 更趋系统化,但是对噪声的影响很敏感。而 EVM 恰恰利用了响应数据中噪声的特性,实质上与 Berni 的判阶算法颇为相似;有关噪声影响的问题,该文分析了两个数值例子的计算机仿真结果,指出通常情况下,当信噪比低于 20dB 时,Prony 法的精度变得极差,而为了获得满意的估算精度则要求信噪比在 30dB 以上。除此之外,文中没有给出任何关于抑制噪声影响的有效方法。

进入 80 年代以来,总的研究势态明显地趋于发展一套不同于 Prony 法的另一类新算法,兴趣集中在提高算法自身的抗噪声能力和估算精度方面。1983 年 Jain 等人提出了提取目标极点的函数束法(Pencil-of-Function),简称 POF 法,这一方法将含有噪声的瞬态数据送入一串特殊的一阶数字滤波器,从而在各子滤波器输出端形成一串所谓的信息信号。对这些信号进行互相关运算即可估算该信号束的克拉姆矩阵,有趣的是以克拉姆矩阵对角线上余因子的平方根为系数的代数方程的零点与目标的极点有明确的一一对应关系,这一关系恰好就是上述子滤波器传递函数的倒数再冠以负号。由于对信号束进行了平滑预处理,POF 法有比 Prony 法更好的抗噪声干扰能力。此法的特点是:计算过程是非迭代的,对采样间隔的选择也不敏感。稍后在 1987 年,Mackay 和 McCowen 指出,虽然函数束法有良好的噪声抑制能力,但是很难对数字滤波器的特性作出最佳的选择,而不适宜的选择常常会导致大的极点估算偏差;此外,又由于采用 IIR 数字滤波器,计算信息信号束时存在截断误差,也降低了估算精度。Jain 当时认为滤波器的形式是唯一的。Mackay 他们首先意识到了 Jain 的这一观点是错误的。实际上,在某种约束下,滤波器的形式可以有任意多种,每一种形式对应的 POF 有着各自的优点和限制。基于这种认识,他们

改进了 Jain 的函数束法,采用一阶的前、后向预测滤波器(是一种 FIR 滤波器)串来形成信息信号。这种改进的 POF 法有良好的噪声抑制能力,无需去选择数字滤波器参数,计算信息信号时不存在截断误差,因而有较高的极点估算精度。运用 Prony 法和 POF 法提取目标极点都必须经由二个步骤,首先是发现一组特征系数,然后求解高阶代数方程。这种分离式“二步骤”法在计算上被认为是低效的。那么,能否找到在噪声环境下有良好性能的、计算上又是紧凑的提取极点的算法? Y. B. Hua 和 T. K. Sarkar 的工作回答了这个问题。他们仿照 Jain 的思想开发出一种提取系统极点的广义矩阵束法(GPOF)。GPOF 在计算效率和噪声敏感性方面皆优于 Prony 法。特别是当信噪比超过某一门限时,该法的精度几乎达到了克拉米罗限。这是一个很诱人的结果。为了提取极点,GPOF 法只需解一个广义特征值问题,整个过程涉及了奇值分解和矩阵伪逆运算,算法是紧凑的,文中还利用了子空间分解技术来优化算法的性能。1987 年,Rothwell 和 K. M. Chen 基于 E-脉冲技术报导了一种新的提取目标自然谐振频率的方法,他们首先将目标的 E-脉冲按一组选定的基函数展开,然后利用线性最小二乘及矩法两种技术确定展开式系数,依据 E-脉冲的性质直接推知由这些系数构成的代数多项式正是目标的本征多项式,它的根对应于目标的极点。Rothwell 的 E-脉冲法在噪声敏感度方面远远地优于传统的 Prony 法,这是因为对目标的瞬态响应进行过两次平滑预处理:基函数相关处理和权函数相关处理。该文实验验证了这一事实,同时还发现估算精度不依赖于极点个数的选择。当阶数低于实际个数时,精度是好的;当阶数超过时,真实极点的精度也是好的,而多余极点对应的留数可以忽略。实验表明,E-脉冲极点提取法不仅适用于高-Q 目标,也适用于低-Q 目标。Drachman 等人从逆问题的角度来看待目标极点的求解过程,指出这一过程本身是一个病态问题(ill-conditioned),于是他们建议采用“规则化”技术把它转化成良态问题(well-conditioned)。文中具体运用了延拓法使牛顿迭

代法的起始解良态化。实验结果表明,此种技术具有很好的噪声抑制能力,也不受极点个数选择的影响,就掌握的资料看,以上各种技术方法基本上反映了目前有关极点抽取算法的研究现状。但是应当看到,对这一问题的探索始终也没有停止过,人们研究的思路千奇百样,其中 Tseng 的共轭梯度法和 FFT 法、Ranm 的极限近似法和 Henderson 的几何法等等都是富有借鉴意义的工作。

直接利用目标的极点作为分类特征来辨识目标是 70 年代中期许多学者的建议,Pearson,Mittra 和 Blaricum 的论文反映了这方面的工作。他们进行了计算机仿真,给出识别器的系统框图,并对其中各子块从硬件实现的角度作了详尽的分析。与此同时,Moffatt 和 Main 从另一侧面提出一种新的目标识别方案。他们以目标的主导极点为特征,依据 Corrington 开发的瞬态响应预测方程设计出一种检测和鉴别雷达目标的预测—相关处理器。其特点是,实际辨识过程不需要抽取出目标的极点。它的主导极点特征库是由反应积分方程法建立起来的,并且采用傅里叶技术来综合目标的斜升响应以作为识别器的输入数据。文中表明,对于直翼式和斜翼式两种细棍飞机模型,识别效果是良好的。近年来,Moffatt 的预测—相关处理格式逐渐地发展成为时域目标识别的一种具有指导意义的规范化结构,广为人们采用。1976 年,C. W. Chuang 将这种处理格式用于 F-4,F-104 和 Mig-19 型飞机的识别,他认为对于外形复杂的目标采用迭代式反应积分方程法来建立特征库是低效的,改用了 Prony 法。稍后在 1982 年,Moffatt 本人和 Rhoads 又将之用于海船的识别问题。在他们的实验研究中,目标瞬态响应是由幅度数据合成的,同时还模拟了海浪杂波的影响,使用的频率在目标的谐振区范围之外。就八种不同的海船目标,文中获得了近 77% 的识别率。L. C. Chen 和 L. Peters 的两篇报告公布了地下浅层目标的识别结果,他们同样使用了预测相关处理格式,但发射信号形式改为视频窄脉冲。由于辨识过程只涉及到简单的代数运算,系统具有实时在位识别地下目标的潜力,文中通过对收

发天线的优化设计,更加改善了系统的识别性能。Volakis 和 Peters 接着研讨了如何去除那些源于收发天线和各种地下杂波的非期望的极点,以此进一步改善识别器的性能。最后,还应提及,1978 年美国 M. I. T. 林肯实验室的 Therrien 在弹道导弹防卫技术发展中心的支持下,研究了一种不同于预测—相关处理格式的序贯目标识别法。这一方法以 wald 的序贯概率比检验为基础,当错误概率在规定的门限之内时,雷达停止对被识目标的照射,分类器做出判决。根据该资料报导,序贯分类器在存储量和计算量方面是优良的,而且非常有效地利用了回波数据的信息。从理论上讲,Therrien 的工作是运用了均方滤波理论中的某些结果,所设计的分类器结构在时域里可以跟自回归时间序列分析和更新过程等概念联系起来,在频域里则可以用最大熵谱估计和最大似然谱估计等技术加以解释。有关时域目标识别技术与方法就简述至此。

## § 1.2 基于频域响应的目标识别

电磁散射理论表明,就表征目标的形状、尺寸和表面组成材料而言,存在着所谓的“占优势”频率范围。目标的电磁散射特性在频域里可粗略地划分为三个区:瑞利区(目标尺寸远小于入射波长)、谐振区(二者大约在同一数量级)和光学区(目标尺寸远大于入射波长)。人们在目标的电磁特性作充分详尽地考查之后发现,波长从目标尺寸的一半延伸到它的十倍对应的频率范围提供了最有用的目标本原信息。具体地说,瑞利散射场指示目标的大小(体积)、光学区散射场反映目标镜面反射点处主曲率半径,刻划了目标精细的局部特征;而谐振区散射场则携带了目标的形状、尺寸等本原信息,表现出可供目标识别资用的最有效的电磁谱特性。目标的谐振区范围取决于目标的总有效尺寸,图 1.1 展示了不同目标尺寸对应的谐振散射区。

由图易见,对于像轰炸机等大型军用目标来说,常规雷达极少

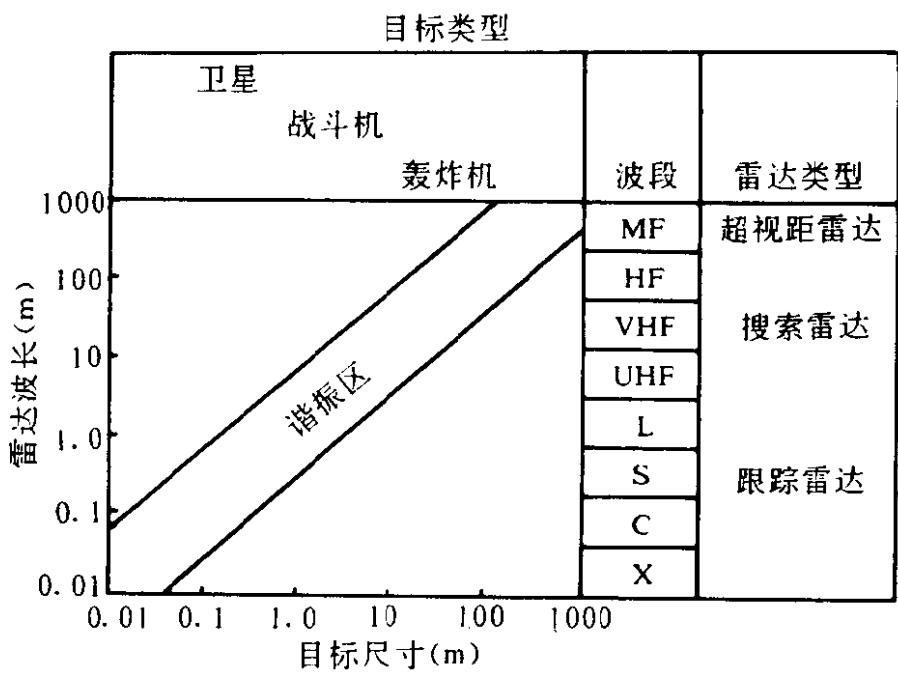


图 1.1 不同目标尺寸对应的谐振区

工作在它们的谐振区上,但是就人造卫星、导弹弹头等空间飞行目标而言,其谐振区大约在 VHF 和 UHF 波段上,这是一般雷达(如搜索雷达)允许的工作频段。源于这样的事实,自 70 年代中期以来,相继出现了一些关于利用低频响应数据辨识目标的报告。Moffatt 和 Shubert 依照有理近似的观点,给出了一种从散射体的导纳数据提取目标主导极点的方法。他们先是运用 Richmond 的细棍模型程序计算出散射体的导纳数据,然后在一个规整的复频率网点上通过有理函数对这些数据进行拟合,拟合出来的分母多项式的零点即是散射体的极点。Moffatt 的初衷是试图将这种方法作为 Prony 法的补足,同时为有关提取极点的迭代搜索方案提供一个良好的初始解。E. K. Miller 的工作进一步深化了 Moffatt 的这一结果,提出一种由目标实频率(而不是复频率)响应获取目标极点的所谓频域 Prony 法(FDPM),并且建议采用多重处理技术(MPT)剔除多余的曲线拟合极点,作者对算法的描述在数学上是精细的,他们的研究揭示了:依据目标的带限电磁响应数据可以求得目标的极点集。从这一点上讲,FDPM 是一种非常有用的数



据内插技术。Ksienski 后来认识到频域法的估算精度同样受到噪声和杂波的限制,于是开发出一种消除这些污染的所谓数据多重组合法。其实质就是将同一目标在各个不同姿态角下的观测值组合起来,以压制污染源的能量,文中给出一个优化的数据组合方案,并在最不利的条件下进行实验验证,结果说明了此法有效地改善了噪声和杂波的限制。这里 Ksienski 不自觉地利用了极点不变性的假设。

1975 年,Repjar 和 Ksienski 描述了从多频雷达回波来识别目标的方法,文中将在瑞利区和谐振区选定的几个频率点上的回波幅度看成一个  $n$  维向量,使目标分类过程转化为  $n$  维空间的线性划分问题。其中线性鉴别函数是按照最小错误概率准则推导出来的。实验表明,这种分类技术具有良好的工作性能,即使在相当可观的噪声和测量误差存在的情况下也能保证低的错误识别率。几乎同时,Y. T. Lin, White 和 Ksienski 对低频多频目标识别问题也作了相应的研究,有关分类特征向量与频率范围的选择同 Repjar 的方案是一样的,他们的结论是:对于像圆柱、立方体、椭球等几何形状较为简单的目标类,利用线性鉴别法可以获得满意的分类效果;对于那些形状复杂的目标类如飞机,采用最近邻法(欧几里德测度)则能实现可靠的分类。可以说,Chevalier 等人随后的研究扩充了 Ksienski 的工作,他报告了一种利用窄带非相干雷达回波来辨识目标的所谓瞬时分类法。这一方法将  $\chi^2$ -平方测度的最近邻法与序贯句法编码技术相结合,即使在单频的情况下,对四种不同飞机的目标类也达到了 88% 的识别率。结果是令人鼓舞的。H. Lin 和 Corporation 研究了识别器工作频率的优化问题,他们试图利用最小数目的频率达到预期的识别效果。为此需要最佳地配置这些频率。该文以八种不同的飞机(F-104, Mig-19, Mig-25, Mig-21, F-4, F-14, SR-71, B-1)为例,说明了最佳配置的过程。结果表明,只使用两个频率时,通过优化配置,可以获得高可靠的分类,这一结论当噪声电平上升到信号电平的 30% 时仍然成