



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点出版规划项目



雷达与探测前沿技术丛书

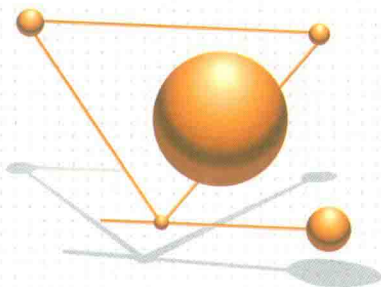
王小谟 左群声 主编

雷达目标散射特性测量与处理新技术

New Techniques for Radar Target Scattering Signature Measurement and Processing

许小剑 著

- ◀ 浅议目标散射函数概念 ▶
- ◀ 详论多维分辨图像解译 ▶
- ◀ 创新定标校准处理技术 ▶
- ◀ 聚焦隐身目标测试方法 ▶



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目
雷达与探测前沿技术丛书

雷达目标散射特性测量 与处理新技术

New Techniques for Radar Target Scattering
Signature Measurement and Processing

许小剑 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

目标 RCS 测量、处理和评估贯穿于隐身装备设计、研制、试验和使用维护的各个阶段。本书在对 RCS 测量与处理技术领域公开文献资料进行归纳和分析的同时,重点对作者所在实验室近年来在该领域的基础理论、实验和应用性研究成果进行了系统的总结,尤其是对国内外现有文献鲜有涉及而工程实用价值又较高的新模型、新方法和新技术进行了讨论。全书一半以上的篇幅用于阐述作者所在实验室的理论和技术研究成果。

全书共分为 8 章,首先建立目标宽带散射函数和散射分布函数的概念,然后围绕可探测目标的 RCS 测试场和宽带成像诊断测量技术问题进行讨论,主要包括: RCS 测试场和宽带相参测量雷达、低散射目标支架设计方法、新型 RCS 定标体与定标处理技术、背景辅助测量与提取技术、目标高分辨率诊断成像技术、极化校准测量与处理技术,以及 RCS 数据的处理、评估与报告等。

本书可供从事低可探测目标设计实验、目标与环境特性、雷达目标散射现象学、武器系统仿真等技术领域的广大研究人员、工程技术人员和部队官兵参考,也可作为相关院校教师和研究生的教学与研究参考书。

图书在版编目(CIP)数据

雷达目标散射特性测量与处理新技术 / 许小剑著.
—北京:国防工业出版社,2017.12
(雷达与探测前沿技术丛书)
ISBN 978-7-118-11418-8

I. ①雷… II. ①许… III. ①雷达目标-散射-特性-研究 IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 007832 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷
新华书店经售



开本 710×1000 1/16 印张 30½ 字数 560千字

2017 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 158.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

作者简介



许小剑 1963年生，江西万安人。1983年合肥工业大学获无线电技术专业工学学士，1986年航天部二院获电磁场与微波技术专业工学硕士，1994年英国帝国理工学院高级访问学者，2002年美国内布拉斯加大学获博士学位。2002年以前在北京环境特性研究所从事科研和科研管理工作，2003年起任北京航空航天大学电子信息工程学院教授、博导。长期从事国防科学技术领域研究工作，主要研究方向包括遥感特征建模、分析与处理，雷达成像、图像理解与目标识别等。获国家科技进步二等奖1项，部级科技进步一等奖2项、二等奖4项、三等奖1项；国务院政府特殊津贴专家、航天总公司有突出贡献专家。合作出版专著与教材5部，发表学术论文260余篇，其中SCI和EI检索约200篇，授权发明专利30余件。

“雷达与探测前沿技术丛书”
编审委员会

主 任	左群声				
常务副主任	王小谟				
副 主 任	吴曼青	陆 军	包养浩	赵伯桥	许西安
顾 问	贲 德	郝 跃	何 友	黄培康	毛二可
(按姓氏拼音排序)	王 越	吴一戎	张光义	张履谦	
委 员	安 红	曹 晨	陈新亮	代大海	丁建江
(按姓氏拼音排序)	高梅国	高昭昭	葛建军	何子述	洪 一
	胡卫东	江 涛	焦李成	金 林	李 明
	李清亮	李相如	廖桂生	林幼权	刘 华
	刘宏伟	刘泉华	柳晓明	龙 腾	龙伟军
	鲁耀兵	马 林	马林潘	马鹏阁	皮亦鸣
	史 林	孙 俊	万 群	王 伟	王京涛
	王盛利	王文钦	王晓光	卫 军	位寅生
	吴洪江	吴晓芳	邢海鹰	徐忠新	许 稼
	许荣庆	许小剑	杨建宇	尹志盈	郁 涛
	张晓玲	张玉石	张召悦	张中升	赵正平
	郑 恒	周成义	周树道	周智敏	朱秀芹

编辑委员会

主 编	王小谟	左群声			
副 主 编	刘 劲	王京涛	王晓光		
委 员	崔 云	冯 晨	牛旭东	田秀岩	熊思华
(按姓氏拼音排序)	张冬晔				

总 序

雷达在第二次世界大战中初露头角。战后,美国麻省理工学院辐射实验室集合各方面的专家,总结战争期间的经验,于1950年前后出版了一套雷达丛书,共28个分册,对雷达技术做了全面总结,几乎成为当时雷达设计者的必备读物。我国的雷达研制也从那时开始,经过几十年的发展,到21世纪初,我国雷达技术在很多方面已进入国际先进行列。为总结这一时期的经验,中国电子科技集团公司曾经组织老一代专家撰著了“雷达技术丛书”,全面总结他们的工作经验,给雷达领域的工程技术人员留下了宝贵的知识财富。

电子技术的迅猛发展,促使雷达在内涵、技术和形态上快速更新,应用不断扩展。为了探索雷达领域前沿技术,我们又组织编写了本套“雷达与探测前沿技术丛书”。与以往雷达相关丛书显著不同的是,本套丛书并不完全是作者成熟的经验总结,大部分是专家根据国内外技术发展,对雷达前沿技术的探索性研究。内容主要依托雷达与探测一线专业技术人员的最新研究成果、发明专利、学术论文等,对现代雷达与探测技术的国内外进展、相关理论、工程应用等进行了广泛深入研究和总结,展示近十年来我国在雷达前沿技术方面的研制成果。本套丛书的出版力求能促进从事雷达与探测相关领域研究的科研人员及相关产品的使用人员更好地进行学术探索和创新实践。

本套丛书保持了每一个分册的相对独立性和完整性,重点是对前沿技术的介绍,读者可选择感兴趣的分册阅读。丛书共41个分册,内容包括频率扩展、协同探测、新技术体制、合成孔径雷达、新雷达应用、目标与环境、数字技术、微电子技术八个方面。

(一) 雷达频率迅速扩展是近年来表现出的明显趋势,新频段的开发、带宽的剧增使雷达的应用更加广泛。本套丛书遴选的频率扩展内容的著作共4个分册:

(1) 《毫米波辐射无源探测技术》分册中没有讨论传统的毫米波雷达技术,而是着重介绍毫米波热辐射效应的无源成像技术。该书特别采用了平方千米阵的技术概念,这一概念在用于干涉式阵列基线的测量结果来获得等效大

口径阵列效果的孔径综合技术方面具有重要的意义。

(2)《太赫兹雷达》分册是一本较全面介绍太赫兹雷达的著作,主要包括太赫兹雷达系统的基本组成和技术特点、太赫兹雷达目标检测以及微动目标检测技术,同时也讨论了太赫兹雷达成像处理。

(3)《机载远程红外预警雷达系统》分册考虑到红外成像和告警是红外探测的传统应用,但是能否作为全空域远距离的搜索监视雷达,尚有诸多争议。该书主要讨论用监视雷达的概念如何解决红外极窄波束、全空域、远距离和数据率的矛盾,并介绍组成红外监视雷达的工程问题。

(4)《多脉冲激光雷达》分册从实际工程应用角度出发,较详细地阐述了多脉冲激光测距及单光子测距两种体制下的系统组成、工作原理、测距方程、激光目标信号模型、回波信号处理技术及目标探测算法等关键技术,通过对两种远程激光目标探测体制的探讨,力争让读者对基于脉冲测距的激光雷达探测有直观的认识和理解。

(二)传输带宽的急剧提高,赋予雷达协同探测新的使命。协同探测会导致雷达形态和应用发生巨大的变化,是当前雷达研究的热点。本套丛书遴选出协同探测内容的著作共10个分册:

(1)《雷达组网技术》分册从雷达组网使用的效能出发,重点讨论点迹融合、资源管控、预案设计、闭环控制、参数调整、建模仿真、试验评估等雷达组网新技术的工程化,是把多传感器统一为系统的开始。

(2)《多传感器分布式信号检测理论与方法》分册主要介绍检测级、位置级(点迹和航迹)、属性级、态势评估与威胁估计五个层次中的检测级融合技术,是雷达组网的基础。该书主要给出各类分布式信号检测的最优化理论和算法,介绍考虑到网络和通信质量时的联合分布式信号检测准则和方法,并研究多输入多输出雷达目标检测的若干优化问题。

(3)《分布孔径雷达》分册所描述的雷达实现了多个单元孔径的射频相参合成,获得等效于大孔径天线雷达的探测性能。该书在概述分布孔径雷达基本原理的基础上,分别从系统设计、波形设计与处理、合成参数估计与控制、稀疏孔径布阵与测角、时频相同步等方面做了较为系统和全面的论述。

(4)《MIMO雷达》分册所介绍的雷达相对于相控阵雷达,可以同时获得波形分集和空域分集,有更加灵活的信号形式,单元间距不受 $\lambda/2$ 的限制,间距拉开后,可组成各类分布式雷达。该书比较系统地描述多输入多输出(MIMO)雷达。详细分析了波形设计、积累补偿、目标检测、参数估计等关键

技术。

(5)《MIMO 雷达参数估计技术》分册更加侧重讨论各类 MIMO 雷达的算法。从 MIMO 雷达的基本知识出发,介绍均匀线阵,非圆信号,快速估计,相干目标,分布式目标,基于高阶累计量的、基于张量的、基于阵列误差的、特殊阵列结构的 MIMO 雷达目标参数估计的算法。

(6)《机载分布式相参射频探测系统》分册介绍的是 MIMO 技术的一种工程应用。该书针对分布式孔径采用正交信号接收相参的体制,分析和描述系统处理架构及性能、运动目标回波信号建模技术,并更加深入地分析和描述实现分布式相参雷达杂波抑制、能量积累、布阵等关键技术的解决方法。

(7)《机会阵雷达》分册介绍的是分布式雷达体制在移动平台上的典型应用。机会阵雷达强调根据平台的外形,天线单元共形随遇而布。该书详尽地描述系统设计、天线波束形成方法和算法、传输同步与单元定位等关键技术,分析了美国海军提出的用于弹道导弹防御和反隐身的机会阵雷达的工程应用问题。

(8)《无源探测定位技术》分册探讨的技术是基于现代雷达对抗的需求应运而生,并在实战应用需求越来越大的背景下快速拓展。随着知识层面上认知能力的提升以及技术层面上带宽和传输能力的增加,无源侦察已从单一的测向技术逐步转向多维定位。该书通过充分利用时间、空间、频移、相移等多维度信息,寻求无源定位的解,对雷达向无源发展有着重要的参考价值。

(9)《多波束凝视雷达》分册介绍的是通过多波束技术提高雷达发射信号能量利用效率以及在空、时、频域中减小处理损失,提高雷达探测性能;同时,运用相位中心凝视方法改进杂波中目标检测概率。分册还涉及短基线雷达如何利用多阵面提高发射信号能量利用效率的方法;针对长基线,阐述了多站雷达发射信号可形成凝视探测网格,提高雷达发射信号能量的使用效率;而合成孔径雷达(SAR)系统应用多波束凝视可降低发射功率,缓解宽幅成像与高分辨之间的矛盾。

(10)《外辐射源雷达》分册重点讨论以电视和广播信号为辐射源的无源雷达。详细描述调频广播模拟电视和各种数字电视的信号,减弱直达波的对消和滤波的技术;同时介绍了利用 GPS(全球定位系统)卫星信号和 GSM/CDMA(两种手机制式)移动电话作为辐射源的探测方法。各种外辐射源雷达,要得到定位参数和形成所需的空域,必须多站协同。

(三) 以新技术为牵引,产生出新的雷达系统概念,这对雷达的发展具有里程碑的意义。本套丛书遴选了涉及新技术体制雷达内容的6个分册:

(1) 《宽带雷达》分册介绍的雷达打破了经典雷达5MHz带宽的极限,同时雷达分辨力的提高带来了高识别率和低杂波的优点。该书详尽地讨论宽带信号的设计、产生和检测方法。特别是对极窄脉冲检测进行有益的探索,为雷达的进一步发展提供了良好的开端。

(2) 《数字阵列雷达》分册介绍的雷达是用数字处理的方法来控制空间波束,并能形成同时多波束,比用移相器灵活多变,已得到了广泛应用。该书全面系统地描述数字阵列雷达的系统和各分系统的组成。对总体设计、波束校准和补偿、收/发模块、信号处理等关键技术都进行了详细描述,是一本工程性较强的著作。

(3) 《雷达数字波束形成技术》分册更加深入地描述数字阵列雷达中的波束形成技术,给出数字波束形成的理论基础、方法和实现技术。对灵巧干扰抑制、非均匀杂波抑制、波束保形等进行了深入的讨论,是一本理论性较强的专著。

(4) 《电磁矢量传感器阵列信号处理》分册讨论在同一空间位置具有三个磁场和三个电场分量的电磁矢量传感器,比传统只用一个分量的标量阵列处理能获得更多的信息,六分量可完备地表征电磁波的极化特性。该书从几何代数、张量等数学基础到阵列分析、综合、参数估计、波束形成、布阵和校正等问题进行详细讨论,为进一步应用奠定了基础。

(5) 《认知雷达导论》分册介绍的雷达可根据环境、目标和任务的感知,选择最优化的参数和处理方法。它使得雷达数据处理及反馈从粗犷到精细,彰显了新体制雷达的智能化。

(6) 《量子雷达》分册的作者团队搜集了大量的国外资料,经探索和研究,介绍从基本理论到传输、散射、检测、发射、接收的完整内容。量子雷达探测具有极高的灵敏度,更高的信息维度,在反隐身和抗干扰方面优势明显。经典和非经典的量子雷达,很可能走在各种量子技术应用的前列。

(四) 合成孔径雷达(SAR)技术发展较快,已有大量的著作。本套丛书遴选了有一定特点和前景的5个分册:

(1) 《数字阵列合成孔径雷达》分册系统阐述数字阵列技术在SAR中的应用,由于数字阵列天线具有灵活性并能在空间产生同时多波束,雷达采集的同一组回波数据,可处理出不同模式的成像结果,比常规SAR具备更多的新能力。该书着重研究基于数字阵列SAR的高分辨力宽测绘带SAR成像、

极化层析 SAR 三维成像和前视 SAR 成像技术三种新能力。

(2)《双基合成孔径雷达》分册介绍的雷达配置灵活,具有隐蔽性好、抗干扰能力强、能够实现前视成像等优点,是 SAR 技术的热点之一。该书较为系统地描述了双基 SAR 理论方法、回波模型、成像算法、运动补偿、同步技术、试验验证等诸多方面,形成了实现技术和试验验证的研究成果。

(3)《三维合成孔径雷达》分册描述曲线合成孔径雷达、层析合成孔径雷达和线阵合成孔径雷达等三维成像技术。重点讨论各种三维成像处理算法,包括距离多普勒、变尺度、后向投影成像、线阵成像、自聚焦成像等算法。最后介绍三维 MIMO-SAR 系统。

(4)《雷达图像解译技术》分册介绍的技术是指从大量的 SAR 图像中提取与挖掘有用的目标信息,实现图像的自动解译。该书描述高分辨 SAR 和极化 SAR 的成像机理及相应的相干斑抑制、噪声抑制、地物分割与分类等技术,并介绍舰船、飞机等目标的 SAR 图像检测方法。

(5)《极化合成孔径雷达图像解译技术》分册对极化合成孔径雷达图像统计建模和参数估计方法及其在目标检测中的应用进行了深入研究。该书研究内容为统计建模和参数估计及其国防科技应用三大部分。

(五) 雷达的应用也在扩展和变化,不同的领域对雷达有不同的要求,本套丛书在雷达前沿应用方面遴选了 6 个分册:

(1)《天基预警雷达》分册介绍的雷达不同于星载 SAR,它主要观测陆海空天中的各种运动目标,获取这些目标的位置信息和运动趋势,是难度更大、更为复杂的天基雷达。该书介绍天基预警雷达的星星、星空、MIMO、卫星编队等双/多基地体制。重点描述了轨道覆盖、杂波与目标特性、系统设计、天线设计、接收处理、信号处理技术。

(2)《战略预警雷达信号处理新技术》分册系统地阐述相关信号处理技术的理论和算法,并有仿真和试验数据验证。主要包括反导和飞机目标的分类识别、低截获波形、高速高机动和低速慢机动小目标检测、检测识别一体化、机动目标成像、反投影成像、分布式和多波段雷达的联合检测等新技术。

(3)《空间目标监视和测量雷达技术》分册论述雷达探测空间轨道目标的特色技术。首先涉及空间编目批量目标监视探测技术,包括空间目标监视相控阵雷达技术及空间目标监视伪码连续波雷达信号处理技术。其次涉及空间目标精密测量、增程信号处理和成像技术,包括空间目标雷达精密测量技术、中高轨目标雷达探测技术、空间目标雷达成像技术等。

(4)《平流层预警探测飞艇》分册讲述在海拔约 20km 的平流层,由于相对风速低、风向稳定,从而适合大型飞艇的长期驻空,定点飞行,并进行空中预警探测,可对半径 500km 区域内的地面目标进行长时间凝视观察。该书主要介绍预警飞艇的空间环境、总体设计、空气动力、飞行载荷、载荷强度、动力推进、能源与配电以及飞艇雷达等技术,特别介绍了几种飞艇结构载荷一体化的形式。

(5)《现代气象雷达》分册分析了非均匀大气对电磁波的折射、散射、吸收和衰减等气象雷达的基础,重点介绍了常规天气雷达、多普勒天气雷达、双偏振全相参多普勒天气雷达、高空气象探测雷达、风廓线雷达等现代气象雷达,同时还介绍了气象雷达新技术、相控阵天气雷达、双/多基地天气雷达、声波雷达、中频探测雷达、毫米波测云雷达、激光测风雷达。

(6)《空管监视技术》分册阐述了一次雷达、二次雷达、应答机编码分配、S 模式、多雷达监视的原理。重点讨论广播式自动相关监视(ADS-B)数据链技术、飞机通信寻址报告系统(ACARS)、多点定位技术(MLAT)、先进场面监视设备(A-SMGCS)、空管多源协同监视技术、低空空域监视技术、空管技术。介绍空管监视技术的发展趋势和民航大国的前瞻性规划。

(六) 目标和环境特性,是雷达设计的基础。该方向的研究对雷达匹配目标和环境的智能设计有重要的参考价值。本套丛书对此专题遴选了 4 个分册:

(1)《雷达目标散射特性测量与处理新技术》分册全面介绍有关雷达散射截面积(RCS)测量的各个方面,包括 RCS 的基本概念、测试场地与雷达、低散射目标支架、目标 RCS 定标、背景提取与抵消、高分辨力 RCS 诊断成像与图像理解、极化测量与校准、RCS 数据的处理等技术,对其他微波测量也具有参考价值。

(2)《雷达地海杂波测量与建模》分册首先介绍国内外海面环境的分类和特征,给出地海杂波的基本理论,然后介绍测量、定标和建库的方法。该书用较大的篇幅,重点阐述地海杂波特性与建模。杂波是雷达的重要环境,随着地形、地貌、海况、风力等条件而不同。雷达的杂波抑制,正根据实时的变化,从粗犷走向精细的匹配,该书是现代雷达设计师的重要参考文献。

(3)《雷达目标识别理论》分册是一本理论性较强的专著。以特征、规律及知识的识别认知为指引,奠定该书的知识体系。首先介绍雷达目标识别的物理与数学基础,较为详细地阐述雷达目标特征提取与分类识别、知识辅助的雷达目标识别、基于压缩感知的目标识别等技术。

(4)《雷达目标识别原理与实验技术》分册是一本工程性较强的专著。该书主要针对目标特征提取与分类识别的模式,从工程上阐述了目标识别的方法。重点讨论特征提取技术、空中目标识别技术、地面目标识别技术、舰船目标识别及弹道导弹识别技术。

(七)数字技术的发展,使雷达的设计和评估更加方便,该技术涉及雷达系统设计和应用等。本套丛书遴选了3个分册:

(1)《雷达系统建模与仿真》分册所介绍的是现代雷达设计不可缺少的工具和方法。随着雷达的复杂度增加,用数字仿真的方法来检验设计的效果,可收到事半功倍的效果。该书首先介绍最基本的随机数的产生、统计实验、抽样技术等与雷达仿真有关的基本概念和方法,然后给出雷达目标与杂波模型、雷达系统仿真模型和仿真对系统的性能评价。

(2)《雷达标校技术》分册所介绍的内容是实现雷达精度指标的基础。该书重点介绍常规标校、微光电视角度标校、球载BD/GPS(BD为北斗导航简称)标校、射电星角度标校、基于民航机的雷达精度标校、卫星标校、三角交会标校、雷达自动化标校等技术。

(3)《雷达电子战系统建模与仿真》分册以工程实践为取材背景,介绍雷达电子战系统建模的主要方法、仿真模型设计、仿真系统设计和典型仿真应用实例。该书从雷达电子战系统数学建模和仿真系统设计的实用性出发,着重论述雷达电子战系统基于信号/数据流处理的细粒度建模仿真的核心思想和技术实现途径。

(八)微电子的发展使得现代雷达的接收、发射和处理都发生了巨大的变化。本套丛书遴选出涉及微电子技术及与雷达关联最紧密的3个分册:

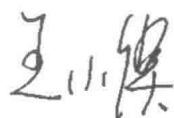
(1)《雷达信号处理芯片技术》分册主要讲述一款自主架构的数字信号处理(DSP)器件,详细介绍该款雷达信号处理器的架构、存储器、寄存器、指令系统、I/O资源以及相应的开发工具、硬件设计,给雷达设计师使用该处理器提供有益的参考。

(2)《雷达收发组件芯片技术》分册以雷达收发组件用芯片套片的形式,系统介绍发射芯片、接收芯片、幅相控制芯片、波速控制驱动器芯片、电源管理芯片的设计和测试技术及与之相关的平台技术、实验技术和应用技术。

(3)《宽禁带半导体高频及微波功率器件与电路》分册的背景是,宽禁带材料可使微波毫米波功率器件的功率密度比Si和GaAs等同类产品高10倍,可产生开关频率更高、关断电压更高的新一代电力电子器件,将对雷达产生更新换代的影响。分册首先介绍第三代半导体的应用和基本知识,然后详

细介绍两大类各种器件的原理、类别特征、进展和应用:SiC 器件有功率二极管、MOSFET、JFET、BJT、IBJT、GTO 等;GaN 器件有 HEMT、MMIC、E 模 HEMT、N 极化 HEMT、功率开关器件与微功率变换等。最后展望固态太赫兹、金刚石等新兴材料器件。

本套丛书是国内众多相关研究领域的大专院校、科研院所专家集体智慧的结晶。具体参与单位包括中国电子科技集团公司、中国航天科工集团公司、中国电子科学研究院、南京电子技术研究所、华东电子工程研究所、北京无线电测量研究所、电子科技大学、西安电子科技大学、国防科技大学、北京理工大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学等近 30 家。在此对参与编写及审校工作的各单位专家和领导的大力支持表示衷心感谢。



2017 年 9 月

雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)是衡量目标对雷达波散射能力的一个重要物理量,目标 RCS 是新一代具有隐身设计的飞机、舰船、地面车辆等军用目标的重要战技术指标之一。

尽管国际上对目标 RCS 的研究可追溯到 20 世纪 50 年代,但对于 RCS 测量技术的系统性研究、发展和应用最主要的还是得益于最近 30 年来以下两个方面的军事需求和技术进展:一是低可探测性目标的设计、研制、试验和性能评估对于 RCS 测量和处理技术的迫切需求,极大地推动了相关技术的发展;二是宽带高分辨率成像测量雷达的出现,使得围绕减小测量不确定度、提高测量精度等的一系列测量和处理新技术得以涌现。事实上,据作者所了解,由于飞行器隐身技术需求的强力牵引和推动,美国等先进国家到 20 世纪 90 年代中后期,其 RCS 测量与处理技术已经基本成熟,但一些核心关键技术作为国家秘密而长期不予公开,并在该领域对包括我国在内的诸多国家实行严格的技术封锁与禁运:各种宽带高功率微波器件、宽带测量雷达系统、低散射目标支架以及 RCS 测量、计算与分析软件等均在禁运之列,甚至对该领域的学术会议和论文也实行禁运。例如,天线测量技术协会(AMTA)年会,是一个主要讨论天线和 RCS 测量与处理技术的学术年会,自 1979 年以来至今已召开 38 届,而长期以来 AMTA 的学术年会论文集就属于对我国的出口管制之列,直到近年来才对我国开放,技术封锁长达 30 多年。

先进国家已建立了众多的室内和室外 RCS 测试场。以美国为例,主要包括:空军所属国家 RCS 测试设施(National Radar Cross Section Test Facility, NRTF)的多个静态 RCS 测试外场、空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)先进室内紧缩场等;海军大西洋测试靶场(Atlantic Test Range, ATR)、雷达反射实验室(Radar Reflectivity Laboratory, RRL)、水面作战中心测试场、路口牧场(Junction Ranch)测试外场、空间与海上作战系统中心(Space and Naval Warfare Systems Center, SPAWAR)动态测试外场等;陆军所属阿伯丁实验中心、国家地面情报中心的专家雷达特征解决方案(Expert Radar Signature Solution, ERADS)紧缩场等;美国国家宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)所属兰利(Langley)研究中心紧缩场、埃姆斯-德莱登(Ames Dryden)飞行研究中心测试场等。工业界和相关研究机构所拥有的测试设施包括:

洛克希德·马丁公司的海伦达尔(Helendale)室外 RCS 测试场、多个室内紧缩场以及专用于隐身飞机出厂测试的室内 RCS 验收测试设施(Acceptance Test Facility, ATF)等;波音公司波德曼(Boardman)测试外场、多个室内紧缩场以及近场测试设施(Near Field Test Facility, NFTF);通用原子能公司格雷巴特(Gray Butte)室外 RCS 测试场(该测试场早期为波音公司所有);诺斯罗普·格鲁曼公司泰昂(Tejon)室外 RCS 测试场;桑迪亚国家实验室的倒 V 形测试外场等。欧洲和其他一些国家也建有先进的室内和室外测试场,如法国的 CELAR 测试场、德国 EADS 的紧缩场和室外静态测试场、英国泰利斯公司 RCS 测试场、南非国防研究院的静态测试场等。对世界上先进 RCS 测试场及其依托机构比对研究不难发现,凡涉及设计、研制和生产低可探测性飞行器的重要国防研究机构和工业部门,无一没有建立其自己的大型静态 RCS 测试外场和紧缩场,其中静态测试外场除桑迪亚国家实验室采用倒 V 形测试场以外,其他测试外场基本上都属于地面平面场。

我国经过几十年来的努力,对 RCS 理论建模、测试和处理技术也已有较为深入和系统的研究。室内测试场一般通过铺覆高性能吸波材料来模拟自由空间测试,既不受地面反射的影响,也不受外部环境气象条件变化的影响。尽管近年来为了满足国家日益迫切的技术需求,国内相关研究机构和航空、航天、兵器等工业部门建立了一批高水平的室内 RCS 测试紧缩场,但目前投入运行的先进室外测试场仅有两个。鉴于需求的迫切性和技术不可替代性,预计未来若干年内我国还将陆续会有更多的大型室内紧缩场和采用地面平面场设计的先进 RCS 测试外场投入运行。

采用地平场设计和低散射金属支架是国内外先进静态 RCS 测试外场最重要的两大特点,其中采用地平场也是外场不同于大多数室内场(模拟自由空间场)之最显著的区别所在。采用地平场设计的 RCS 测试外场除了需要铺覆具有良好反射系数的主反射区和消除任何严重杂波影响的清扫区外,还需根据不同测试频段,调整雷达天线和被测目标高度等几何关系和系统参数,从而利用测试场主反射区地面的多径反射来提高测量中的接收信噪比,同时消除地面多径散射的不利影响。由于测量几何关系不同,且外场还受到环境气象等条件的影响,外场散射测试和处理需满足许多不同于室内场的技术要求。

长期以来,由于西方国家对 RCS 测量相关技术实行技术封锁,只有一些仅涉及数学物理原理而不涉及核心技术的学术论文散见于学术期刊中,其中一些比较新的文献大多讨论自由空间场条件下的测量、定标处理和不确定度分析等基础性问题,鲜有涉及 RCS 外场测量和处理技术。目前,关于国外 RCS 外场测量与处理的技术信息多为从已有的几部公开论著中获得,其中,2007 年出版的《IEEE 1502 - 2007 标准: RCS 测试程序推荐实施通则》针对传统 RCS 幅度测

量,给出了室内和室外 RCS 测试场的测量不确定度分析的基本方法,分析了影响目标测量和定标体测量不确定度的 13 个因素,但作为标准文档,仅涉及基本原理而未涉及具体的关键技术。事实上,国外对 RCS 测量技术具有较详细讨论的专著仍为诺特(Knott)于 1993 年出版的《雷达散射截面测量》(Radar Cross Section Measurement)一书,由于其出版年代相对久远,其中所涉及的技术已相对陈旧。

国内目标特性研究领域科技人员在系统总结过去几十年来研究成果的基础上,也出版了多部相关专著。其中,黄培康院士等所著于 2005 出版的《雷达目标特性》一书系统地讨论了各种雷达目标的 RCS 特性问题,基本不具体涉及 RCS 测量技术;张麟兮教授等 2008 年所著《雷达目标散射特性测试与成像诊断》一书主要讨论微波暗室以及近场测量和处理问题;庄钊文教授等 2007 年所著《军用目标雷达散射截面预估与测量》,聂在平和方大纲主编于 2009 年出版的《目标与环境电磁散射特性建模——理论、方法与实现》则主要讨论电磁散射理论建模和 RCS 预估技术问题,其中后者系汇聚了国内该领域众多专家联合撰写而成,系统地总结了过去 20 年来我国在电磁散射建模研究领域取得的主要技术进展。实际上,国内出版的较系统地讨论微波暗室和外场 RCS 测试的作品,仍然是由黄培康院士主编于 1993 年出版的《雷达目标特征信号》一书,该书对 RCS 测量设备、室内和室外测试场等技术进行了较为全面的论述。

20 世纪 90 年代中期,宽带测量、低散射金属支架和极化测量等技术刚刚获得初步应用,一些低可探测性目标电磁散射测量与处理相关的关键技术仍不够成熟,公开文献资料很少。因此,无论是国内还是国外,此前出版的著作对以下涉及 RCS 测量与处理的新方法、新技术的论及较为鲜见,例如:

(1) 低散射目标支架及低散射端帽几乎已经成为任何用于低可探测目标 RCS 测量的室内场及外场的标配。然而,除了传统基于圆弧段的商用低散射支架产品外形设计外,罕有涉及讨论这类低散射目标支架及低散射端帽设计与性能预估的公开文献。

(2) 金属低散射支架替代传统泡沫支架,对 RCS 定标体提出了不同要求,为减小定标体-支架之间的耦合散射,一般不采用传统的金属球,更多地采用短粗圆柱定标体等一类新型定标体。多数文献基本上只讨论金属球、角形反射器、金属平板等传统定标体,少数几篇文献讨论了短粗金属圆柱的比对测量问题,对于金属圆柱、球面柱、双柱等可以满足金属支架、双重定标等需求的新型定标体的散射机理分析和 RCS 快速计算等 RCS 定标工程应用中遇到的问题,几乎没有参考文献论及。

(3) 低散射支架、宽带测量雷达和高分辨率成像诊断技术的应用,对背景抵消提出了不同的要求,也为背景抑制提供了新途径。针对低散射金属支架的应

用,出现了一些新的背景辅助测量与提取处理技术,但公开文献中并不多见。

(4) 地平场测试外场几乎是设计、研制和生产低可探测飞行器的科研机构必不可缺的测量条件。但是,除讨论基本原理外,几乎没有公开文献深入分析和讨论地平场条件下的一些基本问题,包括地平场条件对于异地同时定标测量、宽带散射测量等带来的诸多限制问题。

(5) 高分辨率 RCS 诊断成像是低可探测目标设计、研制和试验过程中用于评估目标隐身性能、改进设计的最重要的手段之一,在各种先进 RCS 测试场得到了广泛应用。尽管一些文献对于目标高分辨率成像诊断与处理技术、不同散射机理在雷达像中的表现形式、目标一维高分辨距离像(High Resolution Range Profile, HRRP)和二维逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)像的理解、目标高分辨率散射图像与目标 RCS 之间的关系等问题有所讨论,但缺少系统性分析和总结,很难为 RCS 测试工程技术人员所用。

(6) 此外,现有文献对 RCS 极化测量中的极化校准技术、RCS 数据可视化方法、测试不确定度分析方法等也较少涉及。

另一方面,随着低可探测目标技术的发展和应用,我国的隐身装备研制取得了巨大进展,隐身飞行器、坦克和军舰等开始试飞、试验和列装,这对于低可探测目标的内外场 RCS 测试技术提出了迫切的需求。与此相应地,国内工业部门、研究机构等拥有的相关测试场越来越多,无论是测试场设计和运行、测量雷达系统设计和验证、RCS 数据处理,还是实际 RCS 测试工程人员培训,均需要一本能集中反映 RCS 测试领域出现的新概念、新方法和新技术的著作。

正是基于以上认识,作者试图根据多年来所在研究团队在基础研究和工程应用中学到的知识、取得的认识以及提出的技术发明等研究成果进行总结并形成本书,以期作为对国内外已有论著的重要补充,尽最大可能满足 RCS 技术领域广大研究人员、工程技术人员、院校师生和部队官兵的需要。

全书共分为 8 章,各章内容安排如下:第 1 章概论,首先对目标电磁散射特性测量与处理的一些基本概念、定义等问题进行讨论,引入目标散射函数和三维扩展目标散射分布函数的概念,阐述目标 RCS、目标散射函数和目标散射分布函数三者之间的关系,以便于后续各章对目标宽带散射特性相参测量和处理问题的讨论。第 2 章简要介绍目标 RCS 测试场与测量雷达。第 3 章~第 7 章深入分析和讨论 RCS 测试与处理中的专业技术,包括低散射目标支架设计、目标 RCS 定标技术、背景抑制与抵消技术、高分辨率诊断成像与处理技术、极化测量与校准技术。最后,第 8 章 RCS 数据的处理、评估与报告,结合我国相关国军标、美国 ANSI/NCSL Z-540 规范和 IEEE 1502-2007 标准,讨论 RCS 测试数据分析与处理、RCS 数据可视化、不确定度评估以及 RCS 测试文档的组织与报告。

本书的工作得到国家自然科学基金(基金号 61371005)的资助。在本书撰