

近场研究中的 若干理论问题

Several Problems Studied in
Near-Field Theory

李志平 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

近场研究中的若干理论问题

李志平 著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书对电磁辐射与散射测量中存在的普遍性近场问题进行了探索性的研究,内容涵盖了近场辐射快速计算、近场成像和单双站散射测量近远场变换的基本原理、方法和关键技术。书中详细阐述了口径天线近场辐射的空域、谱域和时域理论,理论性地解析证明了卷积核与角谱传递函数的傅里叶变换关系;基于口径辐射理论和近场反投影概念阐述了普适性的近场双站成像方法;基于电磁场的谱域理论阐述了单双站散射严格的近远场变换关系,并提出了雷达散射测量近远场变换的卷积方法。本书旨在解决实际的工程问题,系统性与理论性强,所阐述的理论与方法都经过了实验验证。

本书对于天线、雷达目标特性、雷达成像和制导等学科领域的研究人员、工程技术人员,具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

近场研究中的若干理论问题 / 李志平著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2016. 11

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2317 - 6

I. ①近… II. ①李… III. ①电磁辐射—电磁场—研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 289319 号

版权所有,侵权必究。

近场研究中的若干理论问题

李志平 著

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

北京九州迅驰传媒文化有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:7.25 字数:155 千字

2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5124 - 2317 - 6 定价:25.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

电磁辐射(天线 Antenna)与散射(雷达 Radar、隐身 Stealth)领域的近场研究,具有深远的理论意义和很高的工程价值。早在 1963 年,美国科学家 Kerns 就认为近场理论能一般性地描述雷达与目标组成的系统,将会在诸多领域有广阔的工程应用前景。近场辐射的工程应用主要为天线近场测量,国外的研究起步较早,目前已发展形成 IEEE 1720 标准规范。近场辐射是近场散射的基础,衍生出的近场散射具有更为重大的军事应用价值,如全尺寸雷达隐身目标特性测量、隐身武器近距对抗和导弹末段精密制导等。

近场问题的学术研究遵循建立科学化的系统模型、正向评估系统模型和逆向校正系统模型的路线。作者对近场领域问题的研究源于紧缩场测量雷达散射截面 RCS(Radar Cross Section)技术,RCS 测量依赖于低背景的远场平面波环境,紧缩场的本质功能是物理实现近场到远场的转换。广义上,系统中所有不满足平面波条件的球面波波前近场效应均表现为测量系统级的影响,如大规模 MIMO 阵列近场作用、雷达目标特性近场效应预估和近远场变换。

本书是根据作者在北京航空航天大学博士学位论文编写的,是作者 2008 年前研究工作的总结,研究过程经过导师何国瑜教授的悉心指导,书名亦由何先生拟定。

出版本书是希望促进我国近场辐射与散射技术的推广和发展,服务于我国国防装备的研制,促进我国重大型号装备研制试验能力的提升。

由于作者水平有限,书中难免会有错误与不妥之处,敬请读者指正。

作 者

2016 年 8 月于北京航空航天大学



第 1 章 绪 论	1
1.1 选题背景	1
1.2 近场理论与技术综述	2
1.2.1 口径近场理论与紧缩场技术的发展	2
1.2.2 天线近场测量的发展	4
1.2.3 国外近场测量雷达目标散射特性的发展	6
1.2.4 国内近场测量雷达目标散射特性的发展.....	13
1.3 选题意义.....	14
1.4 主要内容与创新.....	15
第 2 章 口径天线近场的传输特性	17
2.1 空间域的传输特性.....	17
2.1.1 口径场的卷积积分.....	17
2.1.2 口径绕射的广义相似性.....	19
2.2 角谱域的传输特性.....	19
2.2.1 口径辐射场的谱域表达	20
2.2.2 口径绕射渐近相似性的谱域证明.....	22
2.3 时间域的传输特性.....	23
2.3.1 傅里叶变换推导口径辐射的瞬态场.....	23
2.3.2 瞬态辐射的谱域传输.....	24
2.4 仿真计算.....	27
2.4.1 仿真分析系统的传输特性.....	27
2.4.2 计算口径天线的频域近场.....	28
2.4.3 计算口径天线的瞬态近场.....	36
2.5 本章小结.....	38
第 3 章 近场合成孔径雷达成像	39
3.1 算法推导.....	39
3.1.1 近场平面合成孔径三维成像.....	39
3.1.2 近场转台双站二维成像.....	44

3.2	仿真分析	45
3.3	实验验证	47
3.4	本章小结	50
第4章	单站 RCS 测量的近远场变换	51
4.1	近场散射的严格分析	52
4.1.1	近场散射的正向分析	52
4.1.2	近场散射的逆向分析	53
4.1.3	目标散射的模式谱分析	57
4.2	基于散射中心模型的近远场变换	61
4.2.1	近场成像在近远场变换中的应用	61
4.2.2	卷积积分变换方法	62
4.2.3	数值仿真	65
4.2.4	实验验证	70
4.3	本章小结	74
第5章	双站 RCS 测量的近远场变换	75
5.1	基于天线近场扫描的双站 RCS 测量	76
5.1.1	算法分析	76
5.1.2	数值仿真	81
5.1.3	实验验证	86
5.2	基于近场双站成像的双站 RCS 测量	91
5.2.1	算法分析	91
5.2.2	数值仿真	92
5.2.3	实验验证	95
5.3	本章小结	97
	结 论	98
	参考文献	100

第 1 章

绪 论

1.1 选题背景

随着现代通信技术、卫星技术、深空探测技术、隐身与反隐身技术的发展,天线方向图与雷达目标散射特性的测量精密性要求日益提高。传统的测量技术包括外场、紧缩场和近场测量,这三种技术各有特点、互为补充。外场测量是在满足远场条件的空旷场地,对天线和雷达目标直接进行测量。紧缩场测量是利用高精度的反射面,在近距离产生性能优良的准平面波场(静区),从而满足远场测量要求。与外场测量相比,紧缩场测量具有占地小、背景电平低、可全天候工作、保密性好等优点。近场测量是用方向特性已知的扫描探头,在小于远场条件的距离内,忽略多次耦合的前提下,测量天线在某一表面(平面、柱面和球面等)上的辐射或散射场的幅度与相位,经过严格的数学变换确定远场特性。当前电磁散射的近场测量技术并不能满足工程需要。

近场测量有着广泛的工程应用需求,诸如:紧缩场工作的静区(在不同于传统天线远场的菲涅耳(Fresnel)区);多反射面级联而成的准光系统的副面场;天线的近场测量;不满足远场条件的射频仿真系统;雷达导引头的近场响应预测;阵列天线的近场扫描诊断;目标高分辨近场成像;不满足远场条件的单站、双站散射测量的近远场变换,等等。

我国“七五”期间开始调研紧缩场,“八五”期间立项预研,经过 20 多年的研究,已研制出多种类型、多台性能优良的紧缩场,并投入实际应用,承担着紧迫的测量任务^[1]。国内隐身战机、战车、舰船和巡航导弹研制需求与载人航天技术的发展,要求测试场(外场、紧缩场和近场)具有更高的测量精度和更全面的测量功能(大尺寸、宽频带和单双站)。例如,人造卫星和宇宙飞船天线的整星/船测量,1:4、1:2 甚至全尺寸目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量;更高的交叉极化纯度;更低

的背景电平;更宽的频带,低到 UHF,高至毫/亚毫米波段等。另外,基于缩减单站散射(往往难以兼顾双站)设计的隐身战机 F22 和 F35 等开始装备服役,建设双站测试场将成为我国新时期反隐身竞争的迫切需要。

因此,需要深入研究近场辐射和散射,应用与整和近场测量技术,从而提高紧缩场类大型口径天线的设计能力,提高对天线和雷达目标特性的测量能力。这对提高军事科技水平有着重要意义。

1.2 近场理论与技术综述

1.2.1 口径近场理论与紧缩场技术的发展

口径天线或衍射产生的场,根据性质不同可分为三个区域^[2]:Evanescent 区为感应近场,在光学中有扫描近场光学显微技术的应用。Fraunhofer 区为远场辐射场区,口面场的傅里叶变换,天线的方向图、增益,目标的雷达散射截面等均定义在远场^[2]。介于 Evanescent 区和 Fraunhofer 区之间的为 Fresnel 区。在近轴的近似条件下,Fresnel 近场是口面场的 Fresnel 积分,后来发展出了 Fresnel 绕射和用分数阶傅里叶变换计算近场的方法^[3-4]。Fresnel 近场除了在光学系统中有重要应用之外还有诸多应用,如多个反射面级联而成的准光系统的副面在近场,天线罩在辐射器的近场,天线近场测量在近场,紧缩场的静区也在 Fresnel 区等。因此,口径天线的近场理论与技术研究具有基础性和广泛的应用前景。

紧缩场的电尺寸往往都在 60λ (波长)以上,在当前的计算机上难以将有限元、矩量法和时域有限差分等算法作为有效的工具。若用物理光学来评估紧缩场静区性能,用表面电流积分来计算近场,则其复杂度为平方数量级。Fresnel 近似积分和分数阶傅里叶变换,相位上采取的二阶近似限制了其应用范围,只可用于计算较远距离的近轴场。紧缩场的设计须充分计算和分析静区场的性能,为此北京航空航天大学于 1991 年发展出了近场计算的卷积积分法^[5-7]和口径绕射的广义相似性^[8],并将卷积积分的核函数命名为修正格林函数^[9-10]。此外,电磁场的谱域理论被广泛用于口径分析与测量^[11-16],基于卷积积分和谱域方法的内在联系,建立了卷积核函数和谱域传递函数的傅里叶变换关系^[17],用两种方法快速计算近场,并将辐射系统近场传递的概念推广到了时域^[18]。伦敦玛丽女王大学(Queen Mary University of London)的 Rieckmann 等在 2002 年提出了 Diffracted Gaussian Beam Analysis^[19](DGBA)方法,将馈源场和副面反射场展开为高斯波束(局域平面波谱),使用几何光学计算子波束的反射和边缘绕射处理口径边缘。该方法在准光波段具有精度高和速度快的优点。2006 年 Shen Fabin 等比较分析了卷积积分和谱域传递计算近场^[20]。

紧缩场广泛应用于天线和雷达散射截面的测量,反射面紧缩场(见图 1.2.1)是 20 世纪 60 年代由佐治亚工学院 Johnson, R. C 发明^[21],并由美国 Scientific Atlantic

公司(后来的 Microwave Instrumentation Technologies)于 1974 年研制成功的。美国 Huachuca 空军基地于 1988 年建成世界上第一个大型室外单反射面紧缩场(静区 15 m);同期,苏联研制出一个微波暗室内的单反射面紧缩场。单反射面紧缩场布局结构简单,但口面利用率较低,并且由于偏馈结构导致交叉极化较高。后来,荷兰 Eindhoven 大学的 Vokurka 研制出了双柱面紧缩场^[22]。采用两个抛物柱面校准球面波,其等效焦距很长,优化主、副面布局,可改善口面场主极化特性和交叉极化特性,获得优良的静区。但这仍不能根除固有几何结构所带来的空间衰减不均匀和系统口面场的交叉极化分量,交叉极化和主极化的矛盾依然存在。俄亥俄州立大学的 Burnside 和他的同事研制出基于双暗室结构的 Gregorian 紧缩场,几何布局上可以消除交叉极化,并且双暗室布局减小了馈源直漏及副面绕射对静区的影响^[23-24]。德国 MBB 公司(后来的 Astrium 公司)的 Dudok 和 Fasold 研制出补偿式紧缩场,采用前馈卡塞格伦布局,在理论上完全消除了主极化空间衰减不均匀和系统交叉极化分量,并且其等效焦距比双柱面紧缩场更长,口面场幅度一致性更好,可获得更高的口面利用率^[25-28]。美国的 Harris 公司制造出赋形紧缩场,通过几何光学综合法获得较低的边缘照射电平,降低了静区的杂散电平^[29-30]。英国 ERA 技术有限公司的 Farhat 和 Sheffield 大学的 Bennett 提出单柱面紧缩场的概念,通过抛物柱面将球面波校准为柱面波,然后将测试结果通过近远场变换得到远场结果,这样由波束的发散可以获得 100%的口面利用系数^[31-32]。芬兰 Helsinki 理工大学的 Antti 等提出全息紧缩场,并制造了工作在 650 GHz 的全息紧缩场,其适合工作在亚毫米波段甚至更高^[33-34]。20 世纪 90 年代紧缩场技术已经趋于成熟,逐步走向商品化,多家公司已发展出具有各自技术特点的紧缩场系统,例如 MI 公司及 Orbit/FR 公司的单旋转抛物面紧缩场, March 公司的单、双柱面紧缩场, Astrium 公司的补偿式紧缩场及 Harris 公司的赋形紧缩场等。

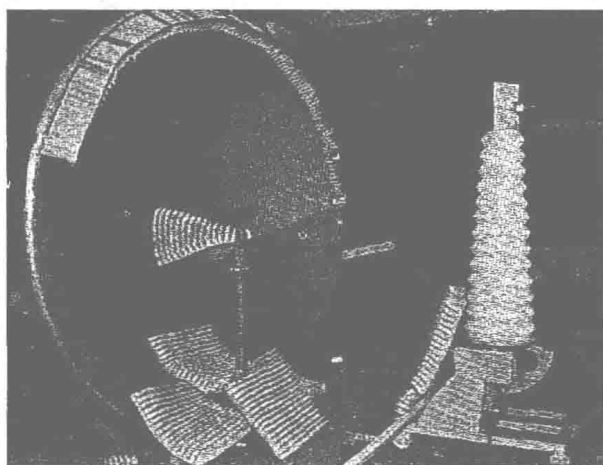


图 1.2.1 世界上第一台单反射面紧缩场(参考文献[21])

我国 20 世纪 80 年代初期,航天部某所引进的 Model 5750 (静区 1.2 m),以及 1991 年航天部某所引进的 Model 5706 (静区 1.8 m),均为 SA 公司的单反射面紧缩场。

我国自“七五”期间开始研究紧缩场以来^[5],已研制出不同尺寸、多种类型的紧缩场^[1]。1992 年,我国自行研制出了国内第一台静区 1.5 m 双柱面紧缩场(见图 1.2.2),2000 年完成了静区 5 m 的大型双柱面紧缩场的建造,2002 年建造了静区尺寸为 4.5 m 的单旋转抛物面紧缩场,2003 年研制出了静区为 0.8 m 的前馈卡塞格伦紧缩场,2004 年研制出了静区为 0.5 m×1.2 m 的单柱面紧缩场。北京航空航天大学在紧缩场技术研发上做了许多工作,何国瑜研究了偏馈赋形紧缩场的电气设计^[35],提出了进行双反射面赋形综合的新公式,并分析了如何补偿和控制交叉极化;葛俊祥研究了反射面拼接缝隙对静区的影响^[36];洪家才通过射线追踪研究了边齿绕射对静区的影响^[37];全绍辉对前馈卡塞格伦紧缩场的电气设计作了研究^[38];陈海波完成了单柱面和前馈卡塞格伦紧缩场的实验研究^[39]。北京航空航天大学在 2009 年完成了静区 6 m 的大型紧缩场,在 2012 年完成了静区 16 m 的超大型紧缩系统。

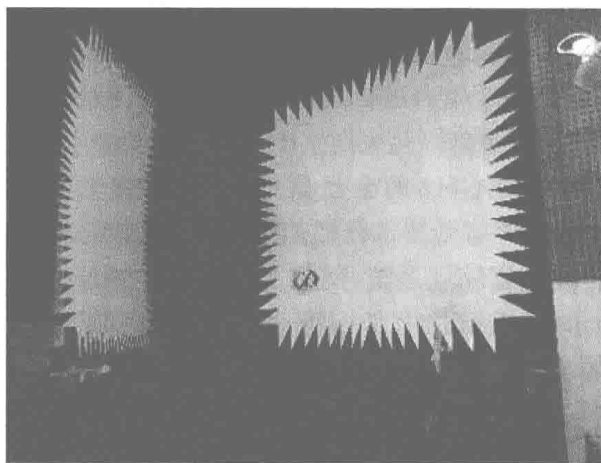


图 1.2.2 国内第一台双柱面紧缩场 C2015(参考文献[1])

1.2.2 天线近场测量的发展

天线近场测量是近场技术的重要内容,经过近 40 多年的发展已经成熟。开展这项研究的主要有美国国家标准局(NBS)、佐治亚工学院(Georgia Tech)、UCLA、丹麦技术大学和西安电子科技大学等,从事这项研究的科学家和工程师有 Kerns、Yaghjian、Wacker、Paris、Leach、Jansen、Larsen、Hansen、Joy、Bucci、Bennett 和毛乃宏等。其中,美国国家标准局和佐治亚工学院做了开拓性工作。天线近场测量系统已商品化,其中代表性的公司有美国的 NSI 和 Scientific Atlantic 公司(SA,后为 MI,目前 NSI 和 MI 已合并)、以色列的 ORBIT 公司(现为 MVG)等。

早在20世纪50年代,从佐治亚工学院发展出来的SA公司当时就在生产天线测量设备,1961年开发出了 $100\text{ in}\times 100\text{ in}$ ($1\text{ in}=25.4\text{ mm}$)平面扫描架和幅相接收机,开始了早期的天线近场测量。1967年,当时从事天线罩研究的Paris^[40-41]建议SA公司支持他的学生Joy研究天线近场测量,SA公司提供了奖学金,并赠予平面扫描架。有趣的是,Joy的近场测量实验室紧挨着Johnson建造的紧缩场^[21]。当时电磁场的波谱理论已经发展起来^[11-13],Joy使用带限波谱重新论述了天线耦合方程,指出带限范围与待测天线和扫描平面间的距离密切相关,并得出近场采样间隔最大不能超过半个波长的结论^[42-43]。1970年Paris的下一个博士生Leach继续研究,着手将测量拓展到使用其他的扫描方式,他们当时就注意到丹麦技术大学(Technical University of Demark)在研发球面扫描系统,于是就转向研究柱面扫描系统。Leach在忽略待测天线与探头间的多次散射前提下,由互易定理导出天线耦合方程,建立了使用FFT的数据处理算法,确立了采样准则,以波导开缝阵列作为待测天线完成其柱面扫描实验,与远场测试结果取得了一致,并于1972年完成了学位论文^[44]。佐治亚工学院后续的研究,如探头补偿^[45]、测试精度分析、探头优化^[46]和扫描误差抑制^[47-49]等相继完成,逐步奠定了佐治亚工学院近场天线测量技术为业界认可的基础。

美国国家标准局的研究源于用微波模拟迈克尔逊干涉仪来测量光速^[50-52],在分析测量误差时,注意到了近场口径绕射的影响。随后激光的问世,提供了更高的测量精度,改变了用微波来测量光速的初衷,于是他们放弃了后续的研究。但是Kerns认为口径绕射理论能一般性地描述雷达与目标组成的系统,将会在其他领域有广阔的应用前景。1963年,Kerns在华盛顿召开的URSI会议上提出了基于绕射理论进行天线近场测量和探头修正的可能性。同年,国家标准局接手了美国国防部的大型天线和阵列天线的高精度远场方向特性图和增益测量。由于传统的远场天线测量技术对如此之大的天线难以处理,因此客观上要求研究新的测试方法。Kerns意识到他的绕射理论能用于天线测量,于是提议国家标准局采取平面近场扫描来确定天线远场特性图。之后经过多年的理论与实验研究,于1970年国家标准局完成了平面近场扫描理论,并公布了近场测试结果和经计算得到的远场方向特性图^[53-54]。该理论在忽略天线之间多次耦合的前提下,完整地描述了任意距离上放置的两副天线之间的相互耦合问题,并且天线的增益、有效面积、远场方向特性图均可从中获得。1969—1973年,美国国家标准局提出了三天线测试方法^[55],可对方向性天线的绝对增益和极化特性实现高精度测量,奠定了天线校准的基础,还预估了误差上限^[56],分析了测量分系统的指标要求、扫描精度和接收机线性度对测量的影响。1981年,Kerns用平面波散射矩阵论述了天线耦合关系^[57]。1988年,Newell等总结了平面近场测量中的误差^[58],分析了截断误差、相位误差、探头方向性、暗室散射、多次反射、扫描精度和幅度误差等18项误差源。国家标准局还研究了柱面、球面扫描形式的近场测量技术;此外,Hansen和Yaghjian还研究了时域平面近场测量技术^[59-61]。

1988年,美国国家标准局的Baird^[62]和佐治亚工学院的Joy^[63]在IEEE *Tans.*

A. & P. 上分别对各自研究天线近场测量技术发展史予以总结回顾,这标志着天线近场测量技术的基本成熟。

1993年, Bennett 发表的题为《一个毫米波半紧缩场》的论文^[31-32],在二维柱面场测量预测天线远场方向特性上,混合使用了“硬件”半紧缩场和“数字”紧缩场(平面波综合或近场扫描),综合二者的优势可以弥补双方的不足。

天线近场测量技术仍在继续发展和完善,如抑制扫描截断误差和测量信号相位误差,提高副瓣测量精度等;使用窗函数综合平面波降低截断误差^[64];基于等效电磁流的方法,以口径场为待求量构造测量近场与计算近场的总均方差为目标泛函,用优化算法求解使目标泛函最小的口径场,由此外推扫描范围外的近场数据以抑制截断误差^[65];用奇异值分解求解由扫描面内采样数据构成的矩阵方程,通过插值级数外推近场数据以降低截断误差^[66];使用定向耦合器提取相位抖动信息,补偿修正测量信号的相位误差^[67],三电缆互相校准^[68],以及无相测量技术^[69];使用具有空间滤波特性的零探头,抑制待测天线主波束来提高副瓣的测量精度^[70-71]。

国内从事天线近场测量研究工作的有中电集团 14 所^[72]、北京理工大学^[73]、南京理工大学^[74]和西北工业大学^[75]等单位,还有文献综述了天线平面近场测量技术的发展,汇总介绍了国内外安装的平面近场扫描系统^[76-78]。

1.2.3 国外近场测量雷达目标散射特性的发展

RCS 测量对目标的隐身设计、探测与识别有着重要意义,传统方法是用紧缩场(见图 1.2.3)或外场(见图 1.2.4),目标一般为缩比模型^[79]。模型的加工误差和不能对涂敷的隐身材料有效缩比,都会降低测量精度。工程上希望直接测量 1:1 尺寸的整机目标,如涂敷隐身材料的真实飞机、舰船或导弹。20 m 的全尺寸飞机在 X 波

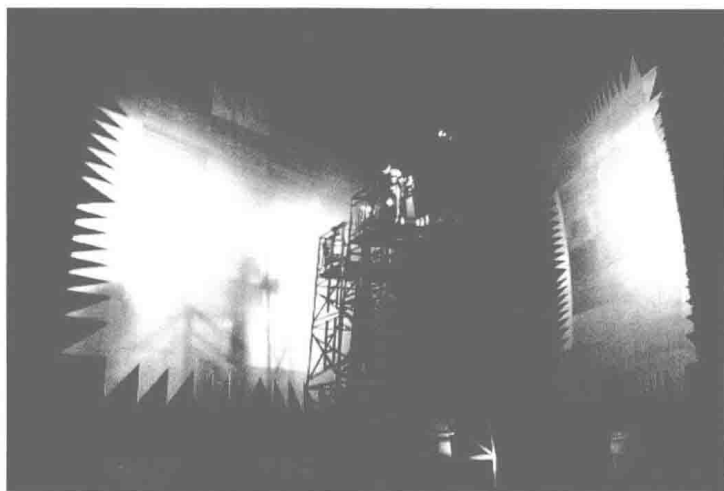


图 1.2.3 北京航空航天大学研制的大型双柱面紧缩场

段需 27 km 距离的外场才可满足远场条件,舰船尺寸测量更为困难。若在紧缩场中测量则需反射面的口径达 40~50 m,这在工程实现上较为困难。当前世界最大的外场是美国国家 Ratsca 场,也只有 2.3 km;世界最大的室外紧缩场(美国空军)的静区也只有 15 m。另外,随着目标特性研究的深入,尤其是对 F117、F22 等采用隐身目标和双基地雷达系统的装备,使双站散射越来越受到关注。若在远场直接测量双站,要求将待测目标同时置于收、发天线的远场,则需比单站测量有更广阔的场地(见图 1.2.5~图 1.2.9)。另外,由于发射、接收系统之间相距较远,为了保证信号相参性,还需额外的装置。若用两台紧缩场来构建双站测量系统(见图 1.2.10),还须解决滑动导轨上反射面的高精度定位、反射面间的耦合等问题,这样不仅造价昂贵,还会破坏暗室的背景电平。



图 1.2.4 美国的室外雷达散射测量场

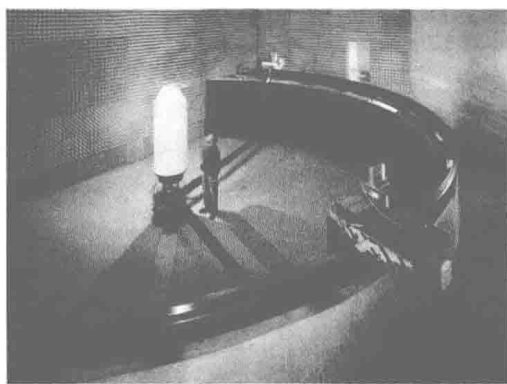


图 1.2.5 法国的双站 RCS 测量场(距离 5.5 m)

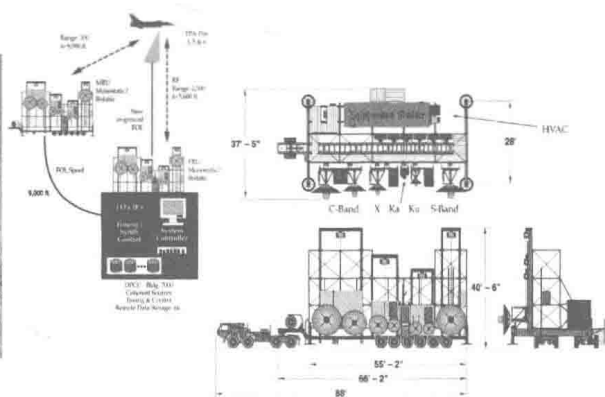
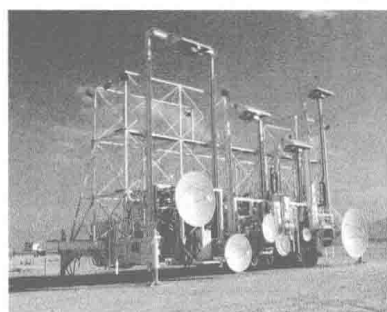


图 1.2.6 佐治亚工学院研制的双站测量系统
(Holloman Air Force Base in New Mexico, 参考文献[80])

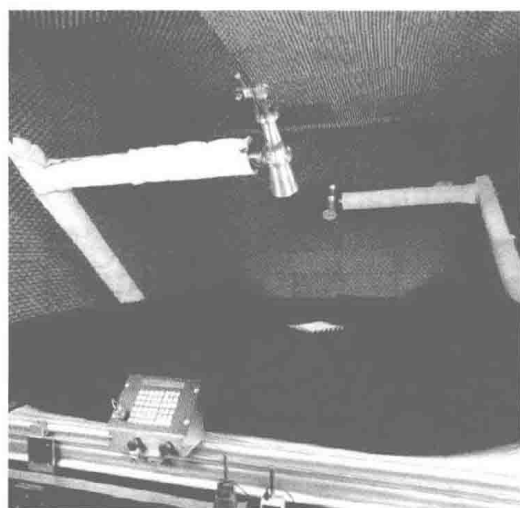


图 1.2.7 德国宇航中心微波雷达研究所的双站测量场

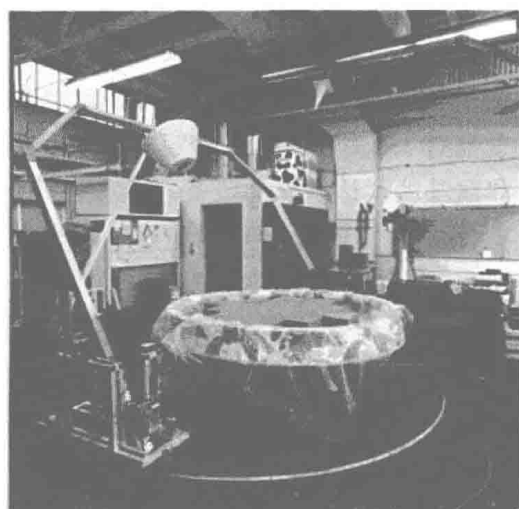


图 1.2.8 密歇根大学的双站测量设备

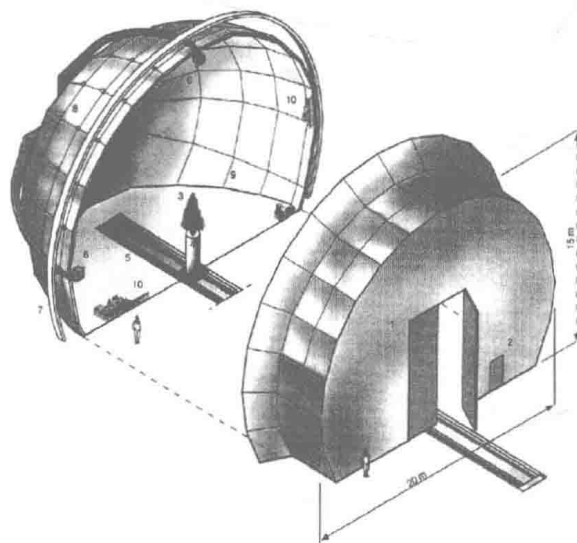


图 1.2.9 欧空局微波信号特征实验室的测试场(参考文献[81])

当目标与测量天线之间的距离不满足远场条件时,测量信号就不是简单地正比于目标的远场散射特性,而是与目标远场特性、测量距离、收发天线特性等因素密切相关。近年来已发展出了多种技术可从近场散射信号中提取目标的远场散射特性,这些技术基本可分为两大类:其一是基于严格的天线近场测量技术,其二是基于雷达成像原理。

最早基于天线测量的近场散射测量可以追溯到 1974 年,佐治亚工学院的 Edwards 等完成了近场双站散射实验^[82]。该实验是由产生平面波的紧缩场和近场平

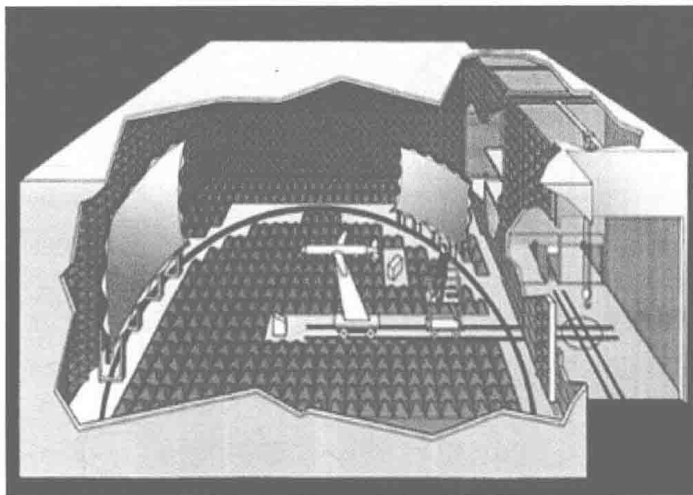


图 1.2.10 美国海军的室内双站测量系统方案

面扫描架分别构建发射、接收系统的。其测量目标为导体平板,采用矢量背景对消来消除暗室与紧缩场直漏对目标信号的影响,获得目标双站散射特性,并对位于其他位置上已知方向特性探头接收的响应加以预测估计。

1979年,Ryan、Weaver和Cown研究目标与天线的近场耦合问题,采用平面波谱和散射体的平面波散射矩阵来分析,经实验后建立了将天线与任意放置目标的散射耦合方程^[83]。1984年,BDM公司的Dinallo将Kerns的平面波散射矩阵理论^[57]推广应用到散射测量,采用了微波网络的概念,提出了近场散射的三天线耦合分析方法^[84-85]。1985年,Joy等对金属导体平板完成了近场单站散射测量实验,由近场单站信号计算出平板远场单站RCS^[86](如图1.2.11所示),但未实验测量过其他目标,而用单双站等效定理^[87]分析了这样缺少近场双站散射信息处理的适用性。1989年,Cown和Ryan回顾了近场散射测量在确定电大和物理大复杂目标近场和远场散射特性测量中的应用,总结了近场散射测量的10种可能方案,分析了各种测量的时间消耗,使用类似于Edwards^[82]的系统完成了F-100缩比模型的双站测量实验,并提出了由近场测量数据来确定目标的平面波散射并矢函数的近似反卷积计算方法^[88]。从发展的历程来看,此前近场散射测量的较多工作是由佐治亚工学院开展的,并且与他们的天线近场测量研究基本同步。

严格的近场散射测量需要完备的近场双站散射信息,对接收天线在围绕目标的曲面上的幅相测量数据的处理等效实现了接收的“远场”,同时还需发射天线在围绕目标的曲面上照射,等效实现照射的“远场”,就可严格地变换出目标的远场双站散射特性(包括单站)。如此复杂的系统和测量数据要求,在工程上实现起来很困难。若用近场扫描和紧缩场组合构建双站RCS测量系统,比双紧缩场方案成本低廉,比室外远场双站方案节省空间,并能比室内远场双站方案测量更大的目标,其不足之处在于需耗费较多的扫描测量时间。

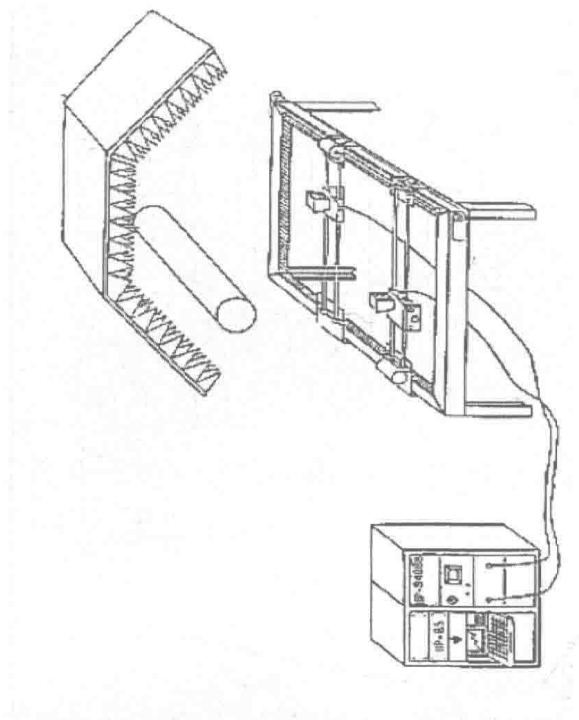


图 1.2.11 Joy 转引 Dinallo^[85] 的近场双探头散射测量图(参考文献[79])

1989年,位于美国新墨西哥州的反弹道导弹(BDM)公司完成了题为 *Near-Field Bistatic RCS (Radar Cross-Section) Measurements* 的报告^[89],对基于近场散射测量来计算目标远场雷达散射截面的可行性加以分析,指出该技术是天线平面近场测量的扩展,可实现单站和双站 RCS 的测量,对近场平面双站 RCS 测量给出了详实的理论推导,并将测量结果与估算结果予以比较,还对重构雷达散射截面所需的近场数据量的缩减加以分析,并且讨论了该测试方法的局限性,最后对该方法的进一步完善发展提出了建议。1991年,俄亥俄州立大学的 Tuhela-Reunin 等^[90]也使用紧缩场发射平面波和近场扫描合成口径替代平面波接收,以导体球和金属圆柱为测试目标,与理论计算结果相比较以验证测试方法的有效性,并分析了尖拱形目标支架、目标以及底座之间的相互作用,但在国内看不到这两份报告的全文。

1993年,M. G. Cote 和 R. M. Wing 使用近场球面扫描来确定目标双站散射^[91]。2001年,密歇根大学辐射实验室的 K. Sarabandi 和 D. J. Zahn^[92]使用平面近场扫描系统接收,用距离较远的天线照射目标(满足远场条件),双站测量了金属平板、金属圆柱,并对定标体的选择进行了比较研究。2006年,美国空军支持研究的 *Bistatic RCS Calculations From Cylindrical Near-Field Measurements* 得以发表,分别在理论和实验上^[93-94]阐述了在微波暗室内使用紧缩场提供平面波照射目标,由围绕目标近距离柱面上的散射场计算双站 RCS 的方法,并给出了抑制轴向和方位向截断误差

的方法,完成了金属球和圆柱的双站测量(见图 1.2.12),获得了宽角度(包括前向)目标双站雷达散射截面。

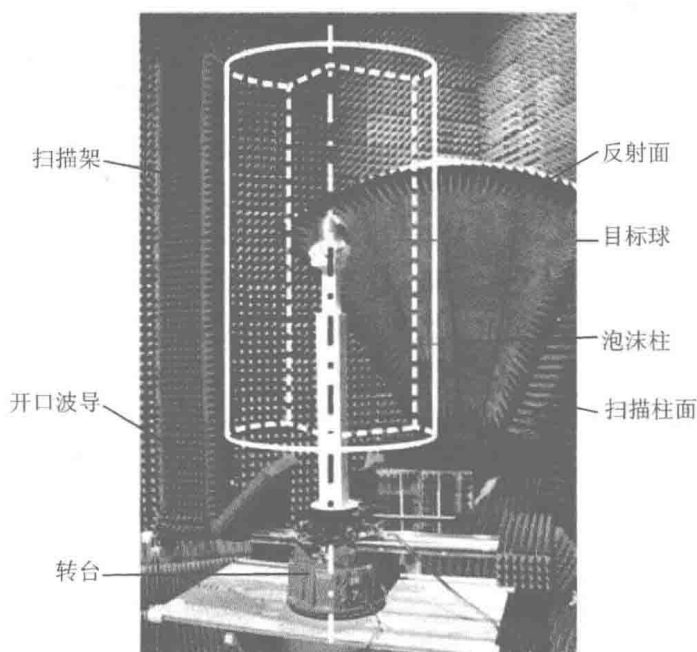


图 1.2.12 美国空军的室内双站测量系统(参考文献[93])

尽管在工程上备受青睐的紧缩场和近场扫描方法能够测得目标被一个方向来的平面波照射,以及多个散射方向接收的远场双站散射,但该方法仍需消耗大量的扫描时间,测量能力也受紧缩场静区尺寸的限制,难以完成大尺寸目标的测量。

1992年,Lahaie^[95]将Dinallo^[84-85]的天线平面近场扫描测量推广到散射测量中,并对所需要完备的四维近场(发射天线2个自由度×接收天线2个自由度)的方法做了三方面修正。牺牲远角度上的测量精度,允许采样间隔大于半个波长,鉴定对远场RCS有贡献的采样平面中的有效区域,预估一定角度范围内的远场RCS所需的近场双站信息,使用近场单站多个频点的数据来代替单个频点的双站数据(Falconer提出的近场单双站等效定理^[96]),并对无限长金属条带做了数值仿真分析。2006年,Bucci在二维情形下^[97],用场的柱面波模式展开,得出了权函数二重卷积的近远场变换方法。分析了远场单站重构所需近场双站信息的多少依赖于散射体的尺寸及天线与目标之间的距离。该结论类似于1992年Lahaie对近场双站有效区域的预估,与天线远场定理^[98]中平面波谱域积分的驻相点相吻合,并与1985年Joy对近场双站信息需求的分析一致^[86]。然而,Lahaie和Bucci对这两个项目的研究都未给出实验结果。

这些严格基于天线测量的近场散射测量技术,都需要近场双站信息。随着目标尺寸的减小和测试距离的增大,会减少对双站数据测试量的需求,但都难以有效地测