

LEIDAMUBIAO
WEIBOCHENGXIANGFANGFA

雷达目标微波成像方法

童创明 包战 主编

西北工业大学出版社

雷达目标微波成像方法

主编 童创明 包战
 编者 童创明 包战 李西敏 钟卫军
 赵杰 杨海豆 冯存前 姬伟杰
 彭鹏 谢波 张伟 赵海洲



西北工业大学出版社



北航 C1710359

TN 957.52
15

143330410

【内容简介】 本书系统介绍了雷达目标微波成像的仿真实理论与方法,共有 13 章。主要内容包括概论、目标特征参数提取及反演、穿墙成像技术、地下目标成像技术、丛林环境中目标成像技术、机载 SAR 微动目标检测及微多普勒提取等。本书是作者在总结近年来雷达目标微波成像的仿真实理论与方法的部分研究成果的基础上编写而成的,可作为高等院校相关专业高年级本科生及研究生教材,以及相关科研院所的工程技术人员研究雷达目标微波成像时的参考资料。

雷 达 目 标 微 波 成 像 仿 真 理 论 与 方 法

童 创 明 包 战 主 编

童 创 明 包 战 主 编

图书在版编目 (CIP) 数据

童 创 明 包 战 主 编

雷达目标微波成像方法/童创明,包战主编.—西安:西北工业大学出版社,2013.10

ISBN 978-7-5612-3849-3

I. ①雷… II. ①童…②包… III. ①雷达目标—雷达成像—微波成像—研究 IV. ①TN957.52

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 244895 号



出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:<http://www.nwpup.com>

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:12.125

字 数:287 千字

版 次:2014 年 1 月第 1 版

2014 年 1 月第 1 次印刷

定 价:38.00 元

西北工业大学出版社

前 言

为使我国防空武器系统在对抗中处于优势,提高生存和反突防能力,需要深入发展目标的雷达成像技术,以增强目标的探测与识别能力。本书研究了目标特征参数提取及反演问题,探讨了隐蔽(墙后、地下及丛林中)目标的成像问题以及机载 SAR 微动目标检测及微多普勒提取。

本书共 13 章,主要包括:

第 1 章为概论。主要分析本书研究内容的意义,阐明雷达目标微波成像方法的国内外研究动态。

第 2 章为优化算法的原理、改进及性能评估。阐述了梯度类优化算法求解优化问题的策略和途径,研究了正则化参数的选取问题;基于多相粒子群算法,结合量子行为算子、云变异模型和单纯形法,提出了混合粒子群算法并给出了算法流程,利用测试函数集评估改进粒子群算法的性能,分析了混合粒子群算法的收敛速度与精度。

第 3 章为基于远场模式的散射体形状反演。阐述了线性抽样法的基本原理,推导二维导体目标远场模式的计算公式,采用 Tikhonov 正则化方法作为求解的策略,结合确定正则化参数的高阶收敛算法进行反演,对比分析不同正则化参数选取方法求解得到的结果。

第 4 章为改进粒子群算法在导体柱电磁成像中的应用。介绍导体柱成像模型中导体柱截面形状表示方法,研究渐进波形估计技术、快速非均匀平面波算法等加速技术,构造导体柱电磁成像逆问题中优化迭代的目标函数,结合混合粒子群算法对导体目标进行反演成像,分析混合粒子群算法的抗随机噪声能力。

第 5 章为改进粒子群算法在介质柱成像中的应用。研究渐进波形估计技术、快速非均匀平面波算法等加速技术,结合混合粒子群算法对介质目标进行反演;讨论 Born 迭代法与混合粒子群算法的结合问题,提出采用 Born 迭代法约束种群的生成,结合混合粒子群算法进行寻优,分析对介质目标反演的有效性。

第 6 章为线性分布的细金属柱体成像。引入多极子展开分析散射体间的耦合作用,在一次、二次散射近似的前提下对模型进行了简化,分别采用截断奇异值分解算法和混合粒子群算法对细金属柱体族的位置分布进行反演,研究渐进波形估计技术加速正散射计算,讨论混合粒子群算法的抗随机噪声干扰能力。

第 7 章为雷达近场成像算法。研究了雷达近场成像算法,针对目标间耦合作用对成像效果的显著减弱,提出了适于多目标成像的基于电四极子辐射理论、混沌信号作为激励源的改进后向投影算法(BPQC),验证了算法的有效性;对近场成像的影响因素进行了分析,利用对照射面为凸面、平面、凹面的三类目标进行了成

像仿真,分析了目标结构对成像的影响,并采用对受噪声污染的数据进行成像来分析 BPQC 算法的抗随机噪声干扰能力。

第 8 章为分层介质中目标成像技术。对分层介质中目标成像的两个研究热点,即穿墙成像和地下目标成像进行了深入研究。对于穿墙成像,研究了墙体存在时回波时延的补偿问题,推导了时延补偿的计算公式,验证了 BPQC 算法对穿墙成像的有效性及时延补偿的正确性;分析了影响时延补偿的墙体参数对成像精度的影响,定量分析了墙体的厚度和相对介电常数变化同目标成像位置的变化关系,并对多目标的识别、墙内目标的探测及人体的成像问题作了仿真;针对墙体参数的测量问题,采用混合粒子群算法反演墙体参数,并进行了验证。对于地下目标成像问题,推导了地下目标电磁波传播的时延补偿公式,验证了 BPQC 算法对地下目标成像的有效性及时延补偿的正确性;将成像算法应用于岩、土体中埋藏的空洞、地雷和城市地下管道的成像,并做了分析。

第 9 章为丛林环境中目标成像技术。分析了丛林探测环境的复杂性,利用间接 Z 变换时域有限差分法建立了多散射环境仿真分析模型,对丛林环境中的单目标和多目标进行了初步成像分析。

第 10 章为单基单通道 SAR 微多普勒。在建立两种典型微动(简谐振动和匀速旋转)目标回波信号模型的基础上,详细推导了不同目标的微多普勒参数化表述;特别指出沿方位向振动目标的微多普勒呈现为非周期性变化特征,且其微多普勒振幅随雷达与目标之间的距离缩短而显著减小;根据信号采样理论,阐述了避免微多普勒模糊的限制条件;提出了一种无需做 RCMC 便可由高分辨时频变换准确提取目标微多普勒特征的方法——“算术平均时频变换法”。该方法操作简单、运算量小,并由仿真实验予以验证。

第 11 章为基于杂波抑制的微多普勒。提出了在 RCD 域由双通道 DPCA 和 ATI 技术抑制地杂波、结合 Radon 变换完成微动目标检测及微多普勒特征提取的两类方法,并给出了相应算法的处理流程。两者的杂波抑制原理不尽相同:SAR/DPCA 是幅度对消,在此模式下可直接由雷达平动补偿后的对消信号经算术平均时频变换提取微多普勒,但受信号幅度差分调制的影响,其微多普勒不够清晰且有间断现象;SAR/ATI 是相位对消,在该模式下不能直接得到目标的干涉复信号,为此提出了一种基于干涉信号虚部重建微动目标干涉复信号的微多普勒提取方法,且受益于 ATI 信号强度增强,其微多普勒更清晰、更完整;指出从避免微多普勒模糊的角度,在较小基线长度的情况下,ATI 模式较 DPCA 模式对雷达 PRF 的要求更宽松、更适宜于大旋翼类目标的微多普勒提取。

第 12 章为双站 SAR 微多普勒。与单站 SAR 体制下的微多普勒有所不同,该体制下的微多普勒不仅与目标微动参数、载波波长相关,而且与双站 SAR 的空间几何配置紧密有关,由此可利用双站 SAR“远距发射、近距接收”的优势来增强

目标的微多普勒特征,并由仿真数据予以验证。从前向散射的角度,提出了一种基于双通道杂波抑制的固定接收机双站 SAR 微动目标检测及微多普勒提取的方法。在该体制下,振动目标的微多普勒呈现为规则的正弦函数调制形式,突破了单基体制下由非周期性和周期性函数叠加的形式,使其微多普勒特征有效增强,并给出了一种双站 SAR/DPCA 模式下简易可行的目标微动中心定位方法。

第 13 章为极化 SAR 微多普勒。详细推导了该体制下的微多普勒参数化表述,指出了其与传统 SAR 体制下的主要区别。基于瞬时极化测量的方法,提出了一种基于双通道 DPCA 杂波抑制的极化 SAR 自旋目标检测及微多普勒特征提取方法,该方法可获取目标在不同极化组合下的多幅微多普勒谱图,利于全面刻画目标的散射特性。为有效增强较低 SNR 下的微多普勒特征,提出了基于 Pauli 基展开的联合极化 SAR 微多普勒提取方法,由此可显著提高某一联合极化组合通道下的 SNR,从而得到更为清晰的微多普勒谱图。

本书是笔者在总结近年来关于雷达目标微波成像方法仿真实理论与方法的部分研究成果的基础上编写而成的,可供国内同行参考。

本书由空军工程大学童创明教授、解放军 61683 部队包战高级工程师主编,参加编写的还有西安卫星测控中心钟卫军博士,空军工程大学李西敏讲师、赵杰副教授、杨海豆讲师、冯存前副教授、姬伟杰博士、彭鹏硕士、谢波讲师、张伟博士和赵海洲副教授,参加部分章节内容编写的还包括彭鹏硕士付树洪博士、蔡继亮博士、赵玉磊博士、邹雄博士、孙佳佳博士、李昌泽博士、李丹硕士、彭鹏硕士、王童硕士、帅玮玮硕士等。本书的出版得到了国家自然科学基金(61372033)、军队“2110 工程”军用电子科学与技术学科专业领域建设项目、毫米波国家重点实验室开放课题基金(K200818,K200907)、航空基金(20130196005)和陕西省自然科学基金(2011JM8025)的资助,同时对西北工业大学出版社的大力支持表示感谢。

雷达目标微波成像方法的研究及应用方兴未艾,谬误不足之处在所难免,请专家和读者指正。

1.2 二维导体柱电磁成像 31

1.3 导体柱成像的加速实现 35

参考文献 40

编 者

第 5 章 改进粒子群算法在介质柱成像中的应用 2012 年 12 月

5.1 二维介质柱的散射问题 42

5.2 二维介质柱的成像问题 43

5.3 二维介质柱成像的加速实现 45

5.4 基于波恩迭代法与粒子群算法的电介质参数重构 49

参考文献 53

目 录

参考文献	154
第12章 双站 SAR 微多普勒	156
12.1 平面模式下的微多普勒分析	156
12.2 固定接收机模式下的微多普勒	165
第1章 概论	1
1.1 研究的背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
参考文献	6
第1篇 目标特征参数提取及反演	183
第2章 优化算法的原理、改进及性能评估	13
2.1 梯度类优化算法	13
2.2 标准粒子群算法	17
2.3 改进的混合粒子群优化算法	17
2.4 粒子群优化算法的性能评估	21
参考文献	27
第3章 基于远场模式的散射体形状反演	29
3.1 线性抽样法	29
3.2 远区散射场的近似	30
3.3 求解方法和策略	31
3.4 数值算例	31
参考文献	32
第4章 改进粒子群算法在导体柱电磁成像中的应用	33
4.1 成像模型	33
4.2 二维导体柱电磁成像	34
4.3 导体柱成像的加速实现	35
参考文献	40
第5章 改进粒子群算法在介质柱成像中的应用	42
5.1 二维介质柱的散射问题	42
5.2 二维介质柱的成像问题	43
5.3 二维介质柱成像的加速实现	45
5.4 基于玻恩迭代法与粒子群算法的电介质参数重构	49
参考文献	53

第 6 章 线性分布的细金属柱体成像	54
6.1 细金属柱体散射原理	54
6.2 基于截断奇异值分解的细金属柱体成像	55
6.3 基于伪群交叉算法的细金属柱体成像研究	58
6.4 基于改进粒子群算法的细金属柱体成像加速实现	60
参考文献	61

第 2 篇 复杂环境中目标成像技术

第 7 章 雷达近场成像算法	62
7.1 雷达近场成像模型分析	62
7.2 雷达近场成像算法	65
7.3 目标近场成像的影响因素分析	74
参考文献	78
第 8 章 分层介质中目标成像技术	79
8.1 穿墙成像技术	79
8.2 地下目标成像技术	95
参考文献	104
第 9 章 丛林环境中目标成像技术	106
9.1 丛林环境下的成像模型	106
9.2 丛林环境下的成像算法	107
9.3 丛林环境下成像的初步研究	108
参考文献	111

第 3 篇 机载 SAR 微动目标检测及微多普勒提取

第 10 章 单基单通道 SAR 微多普勒	112
10.1 振动目标的微多普勒效应分析	112
10.2 旋转目标的微多普勒效应分析	116
10.3 “算术平均时频变换法”提取微多普勒	117
参考文献	124
第 11 章 基于杂波抑制的微多普勒	126
11.1 SAR 微动目标检测	126
11.2 基于杂波抑制的振动目标微多普勒提取	131
11.3 基于杂波抑制的旋转目标微多普勒提取	146

参考文献	154
第 12 章 双站 SAR 微多普勒	156
12.1 平飞模式下的微多普勒分析	156
12.2 固定接收机模式下的微多普勒分析	165
参考文献	172
第 13 章 极化 SAR 微多普勒	174
13.1 极化 SAR 理论基础	174
13.2 基于杂波抑制的极化 SAR 微多普勒分析	178
13.3 基于 Pauli 基展开的联合极化 SAR 微多普勒分析	183
参考文献	184

件下探测并识别采用隐蔽技术、伪装手段及欺骗技术的固定和活动目标。因此深入发展目标的隐身技术实现特征信号的高探测性,增强目标的探测与识别能力,提高战场的“透明度”,才能使我方防空武器系统在对抗中处于优势,提高生存和反突防能力,更好地发挥作战效能。

在自然科学和工程技术领域中,依靠直接测量来获取一些未知量有时候是不可行的,或是不可能的,利用与这些未知量有关的偏微分方程,测量与这些未知量有一定关系的其他量在边界上的变化规律或其他可以获得的信息去估计所求的未知量,就是求解偏微分方程边值问题的过程。电磁逆散射问题^[1]就是利用电磁波照射目标产生散射回波,通过分析散射回波信号的散射回波中,利用散射目标的相关先验知识,经过适当的数学处理后提取散射目标的电参数特性,如目标的外形轮廓、尺寸、位置、电参数特性等。电磁逆散射问题的研究能使人们不用直接接触目标就能获得所需要的目标信息。军事需求推动导体目标电磁逆散射问题的研究,各种军事目标,如飞机、导弹、军舰、地雷等目标的识别和探测为导体目标电磁逆散射研究提供了广阔的用武之地;而飞机目标的隐身和反隐身问题同样推动着介质目标电磁逆散射问题的研究;日益增长的民用需求是推动介质目标电磁逆散射问题研究的主要动力,使其在地形测绘与地质研究、农作物与森林的生长监测、海洋研究与监测、医学诊断、材料无损探测、机场海关货检等领域发挥着重大的作用,因而本书研究的内容具有非常重要的民用和军事应用价值。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种全天候、全天时的遥感设备,主要应用于地面静止目标成像。对于地面或海洋中的运动目标,由于其与静止目标之间存在相对运动,故在 SAR 场景图像中会出现散焦、模糊和错位等现象^[2]。随着 SAR 成像技术的发展和应用领域的扩展,人们不仅希望 SAR 能够对测绘带内的静止目标进行精确成像,而且能够准确检测出其中的运动目标^[3]并估计其相关参数^[4],即具备地面运动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)能力。SAR/GMTI 工作模式是机载和星载雷达迫切需要具备的一项功能,它融合了 SAR 和 GMTI 两者之间的协同关系,将运动目标的位置和动向标注在清晰的 SAR 图像上,其在战场感知和交通监测等领域已获得广泛应用^[5]。现有的 SAR/GMTI 系统主要包括:基于机载平台的美国的 JSTARS 系统、德国的 FAMIR 系统等;基于星载平台的加拿大的 RadarSat-2 系统、德国的 TerraSAR-X 系统等。实际上,很多目标不仅具有常见的直线运动形式,而且还有除质心平动以外的旋转、振动和进动等微动(micro-motion)形式,例如引擎工作引起的车辆振动,地基或舰载对空监视雷达天线罩的转动,直升机

第1章 概 论

1.1 研究的背景及意义

随着现代高技术局部战争向信息化、智能化转变,全方位、立体化的侦察手段是现代战争中实施精确打击的基础,但现有的侦察手段还不能做到战场的完全“透明”。精确打击要求能准确、及时地确定目标的位置及特征,把武器准确地导向目标,但是很难在各种地形及气象条件下探测并识别采用隐蔽技术、伪装手段及欺骗技术的固定和活动目标。因此深入发展目标的隐身技术实现特征信号的高探测性,增强目标的探测与识别能力,提高战场的“透明度”,才能使我方防空武器系统在对抗中处于优势,提高生存和反突防能力,更好地发挥作战效能。

在自然科学和工程技术领域中,依靠直接测量来获取一些未知量有时候是不可行的,或是不可能的,利用与这些未知量有关的偏微分方程,测量与这些未知量有一定关系的其他量在边界上的变化规律或其他可以获得的信息去估计所求的未知量,就是求解偏微分方程逆问题的过程。电磁逆散射问题^[1-3]就是利用电磁波照射目标产生散射回波,在包含散射目标信息的散射回波中,利用散射目标的相关先验知识,经过适当的数学处理后提取散射目标的电参数特性,如目标的外形轮廓、尺寸、位置、电参数特性等。电磁逆散射问题的研究能使人们不用直接接触目标就能获得所需要的目标信息。军事需求推动导体目标电磁逆散射问题的研究,各种军事目标,如飞机、导弹、军舰、地雷等目标的识别和探测为导体目标电磁逆散射研究提供了广阔的用武之地;而飞机目标的隐身和反隐身问题同样推动着介质目标电磁逆散射问题的研究;日益增长的民用需求是推动介质目标电磁逆散射问题研究的主要动力,使其在地形测绘与地质研究、农作物与森林的生长监测、海洋研究与监测、医学诊断、材料无损探测、机场海关货检等领域发挥着重大的作用,因而本书研究的内容具有非常重要的民用和军事应用价值。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种全天时、全天候的遥感设备,主要应用于地面静止目标成像。对于地面或海洋中的运动目标,由于其与静止目标之间存在相对运动,故在 SAR 场景图像中会出现散焦、模糊和错位等现象^[4-6]。随着 SAR 成像技术的发展和应用领域的扩展,人们不仅希望 SAR 能够对测绘带内的静止目标进行精确成像,而且能够准确检测出其中的运动目标^[4-8]并估计其相关参数^[9-13],即具备地面动目标检测(Ground Moving Target Indication, GMTI)能力。SAR/GMTI 工作模式是机载和星载雷达迫切需要具备的一项功能,它融合了 SAR 和 GMTI 两者之间的协同关系,将运动目标的位置和动向标注在清晰的 SAR 图像上,其在战场感知和交通监测等领域已获得了广泛应用^[14-18]。现有的 SAR/GMTI 系统主要包括:基于机载平台的美国的 JSTARS 系统、德国的 PAMIR 系统等;基于星载平台的加拿大的 RadarSat-2 系统、德国的 TerraSAR-X 系统等。实际上,很多目标不仅具有常见的直线运动形式,而且还有除质心平动以外的旋转、振动和进动等微动(micro-motion)形式,例如引擎工作引起的车辆振动,地基或舰载对空监视雷达天线罩的转动,直升机

的旋翼转动,弹道导弹弹头的自旋进动等。目标微动会对雷达回波信号产生附加的频率调制,产生以目标主体多普勒频率为中心的边带,这种由于目标微动引起的调制称为“微多普勒(micro-Doppler, m-D)现象”^[19-23]。微多普勒效应是目标结构部件和目标主体之间相互作用的结果,体现了目标的独特特征,且与传统的成像识别方法相比,微多普勒特征具有更为优良的鲁棒性,如微动频率特征不会随雷达视角及目标姿态的变化而变化,因此近年来目标微动及其激励的微多普勒调制现象已成为雷达成像与目标识别领域的研究热点。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 目标特征提取技术的研究进展

一系列广泛而深入的研究及众多学科的应用需要,共同推动了目标电磁逆散射问题研究全面而深入的发展:研究对象从自由空间中的目标反演拓展到复杂电磁环境下的目标电磁成像;求解方法从传统的梯度类优化算法发展到智能优化算法;入射电磁波从平面波发展到超宽带信号照射及音频信号照射;分析特性从单纯地确定目标的位置发展到反演目标的外形轮廓、电参数特性等研究。

随着电磁逆散射问题研究的发展,X光依靠生物组织的密度差异对生物体进行了成像。为了改善重构算法的可靠性和速度,衍射断层成像技术^[24]考虑了X射线成像衍射效果,实现了准实时的成像。为了克服Born或Rytov近似的局限性,人们开始注重非线性积分方程的精确求解,为克服不适定性出现了伪逆变换技术,也出现了优化迭代的成像算法。Wang与Chew提出了运用Born迭代^[25]和变形Born迭代使非线性方程线性化,通过多次迭代求逆问题,后者的收敛速度比前者快。Joachimowicz把Newton-Kantorovitch算法^[26]应用于电磁逆散射问题,该方法一般需要正则化过程以克服不适定性,从而加速收敛,且能在测量数据存在误差的情况下提高成像的质量。Wang和Zhang采用非相关照射以增加关于目标的信息^[27],并通过简单的矩阵运算得到了较好的重建结果。Barkeshi和Lautzen Heiser采用精确的梯度搜索法求解非线性耦合积分方程^[28],迭代反演目标特性。Kleinman和Van den Berg提出了改进梯度法^[29],其目标函数包括两部分的归一化误差:一是场方程的满足,二是测量数据的匹配,使用超松弛、梯度和共轭梯度的方法来最小化目标函数。该方法不需要另外引进正则化技术。Rocco Pierri和Angelo Lissenno采用物理光学法和截断奇异值分解算法^[30]对导体目标进行成像,该方法能对多个导体目标进行成像,具有一定的抗噪声干扰的能力。粒子群算法、遗传算法等群智能优化算法是近年兴起的优化算法。Salvatore用遗传算法和矩量法^[31-34]对介质目标进行了反演,取得了较好的效果;Tony Huang采用微粒子群算法和时域有限差分法对三维介质目标进行了成像^[35],能够解决较大规模的成像问题;Matteo Pastorino研究了随机类优化算法在电磁成像中的应用^[36],并对最新的几种随机类优化算法(如粒子群算法、蚁群算法、遗传算法、差分演化算法等)进行了对比分析。

1.2.2 隐蔽目标成像技术的研究进展

对于隐蔽目标成像^[91-146],目前主要在穿墙成像、地下目标成像和丛林环境中目标成像等方面进行了深入的研究,其中穿墙成像和地下目标成像属于典型的雷达近场成像的研究范畴。由于雷达近场成像中辐射脉冲的宽频带特性、背景介质的随机性以及目标的复杂性,定量的描述介质分布的电磁参数存在一定的困难,因此对雷达近场成像问题的研究一直是一个热点问题。目前研究较多的是探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)^[91-97]和穿墙成像雷达(Through-the-Wall Imaging Radar, TWIR)^[98-103]。这两者都是利用电磁波在媒质电磁特性不连续处产生的反射和散射实现对非金属覆盖区域内目标的定位和成像,进而辨识探测区域的电磁特性变化以及目标的位置、电磁特性等。而对于丛林环境中目标的成像,由于丛林属于典型的复杂多散射传播环境,造成电磁波产生严重的多径效应,将经历多次反射、折射和绕射等,因而丛林环境的电磁波传播模型建模和丛林环境中目标的探测与识别都存在很大的困难。

1. 穿墙成像技术

穿墙雷达^[37-53]是伴随着大规模巷战和反恐等军事需求而发展起来的一种新型雷达技术,主要通过获取并分析回波信号携带的信息,探测隐藏在可穿透介质如黏土墙、介质板、混凝土等之后的目标,获得距离、方位等信息。该技术可以实现对建筑物内无法看见的恐怖分子或人质的侦查、定位和跟踪,探测城区巷战中隐藏在建筑物内的敌人位置,搜救战场伤员,实现非接触式的隔物探测危险品(如金属武器)等。

穿墙雷达的研究近几年发展迅速,已研制成功一系列产品。美国的 Time Domain 公司制造出世界上第一台基于脉冲体制的穿墙透视系统 Radar Vision 1000,随后又推出了 Radar Vision 2000 及 Radar Vision 2iTM;劳伦斯国家实验室利用微功率脉冲雷达可以检测到 40cm 厚的混凝土墙体另外一侧的人;以色列的 Camero 公司开发的 Xaver 800 系统^[38]基于脉冲体制能实现三维穿墙成像;英国剑桥咨询中心研制的便携式内部空间监视雷达(简称 PRISM-200)基于脉冲体制可以显示出测量区域的 2D 或 3D 图像,可以穿透 40cm 厚的传统建筑材料,探测人员活动距离可达 15m;美国 Eureka 航空公司正在利用具有极高分辨率的瞬时脉冲合成孔径雷达开发穿墙探测系统(简称 ImpSAR);土耳其的 Sabanci University^[39]和乌克兰基辅(Kiev)的 Ratio 公司^[40]也研制了基于脉冲体制的穿墙雷达;加拿大渥太华 DRDC 公司自 2001 年也开始了超宽带短脉冲穿墙定位/成像系统的研究^[41];美国 ALELA 正进一步致力于随机分布天线阵穿墙监测反恐雷达技术以及分布式雷达传感器网络穿墙监测技术^[42]等。

国内在超宽带穿墙成像技术研究方面也进行了一系列研究,中国科学院电子学研究所^[43-44,49-50]、北京理工大学^[45]、国防科学技术大学^[47-48]、电子科技大学、西安电子科技大学^[53-54]、哈尔滨工业大学、武警西安指挥学院等国内单位正在进行相关的研究工作。经过几年的努力已经取得了一定的成绩,其国防科技大学电子科学与工程学院已经开发了 Rdar-Eye 穿墙探测雷达^[47],它是一种超宽带微功率冲激脉冲雷达系统,采用超宽带冲激脉冲对非金属墙体后人体目标进行探测,探测距离可达到 3~5 m。对比国内外穿墙技术研究的发展概况可以发现,我国的穿墙探测成像技术研究与西方还有一定的差距。

从已有的资料来看,超宽带穿墙成像对于国内外众多科研人员来说还是一个崭新的课题,

系统的设计实现还面临着许多挑战。由于超宽带穿墙成像系统设计的目标是使系统的性能满足应用的需求,因此系统性能的研究成为了系统设计的关键问题。穿墙成像系统的性能指标主要和图像质量有关,包括目标的检测能力、定位精度、空间分辨能力等。本书假设目标可以被检测到,结合超宽带穿墙成像的特点,重点研究了墙体环境下的成像问题,提出了一种基于电四极子辐射理论、采用混沌信号作为激励源的改进后向投影成像算法,并论证了改进成像算法的成像质量要优于后向投影算法,为该成像算法在穿墙雷达领域的应用提供了指导。

2. 地下目标成像技术

探地雷达是地下目标无损探测^[55-72]中最具有应用前景和发展前途的技术之一,其应用范围非常广泛,在隧道结构检测^[55-56]、路基检测及路面沉降探测^[57-58]、城市地下管道探测^[59-60]、岩溶地质勘探^[61]、堤坝安全探测^[62-63]、排雷作业^[64]等领域都有重要的应用。探地雷达的应用根据探测深度可分为浅层、中层、深层应用三种,通常探深 0.5 m 以下为浅层探测,0.5~5 m 为中层探测,5 m 以上为深层探测。本书主要针对浅、中层中的目标进行成像研究。

在地下目标成像方面,K. Demarest 等人^[65]对多层媒质中的散射体建立时域有限差分模型进行了分析;方广有等人^[66]在国内最早对地下三维目标电磁散射特性进行了研究;A. Sullivan 等人^[67]分别用快速多极子法(Fast Multipole Method, FMM),矩量法(Moment Of Method, MOM)和物理光学(Physical Optics, PO)建立了探测地下哑弹的模型,比较了各种方法的精确度,理论成像结果和实际系统的成像结果非常吻合;Y. Bo 等人^[68]采用二维 FDTD 研究了探地雷达在实际土壤中的应用问题;瑞典学者 D. Uduwawala 等人^[69]将 FDTD 法运用于有耗和色散媒质中的探地雷达系统;朱亚平等人^[141]针对脉冲体制穿墙雷达系统中回波信号结构复杂、信噪比低、信号检测困难等问题,提出了一种“小波双谱”联合检测新算法;杨虎等人^[70]将多区域时域伪谱(Multi-domain Pseudo Spectral Time Domain, MPSTD)算法,以及将特征变量与物理边界(Characteristic Variables Physical Boundary, CV-PB)匹配条件相结合来模拟探地雷达模型,分别对平坦地表、粗糙地表下不同电磁参数、不同形状目标的散射特性进行了分析;鲁晶津等人^[71]采用多重网格法研究了地球电磁三维数值模拟及应用;屈乐乐等人^[72]研究了压缩感知理论(Compressive Sensing, CS)在频率步进探地雷达偏移成像中的应用。

3. 丛林环境下目标成像技术

对于电磁波来说,丛林属于典型的复杂多散射传播环境^[73]。电磁波在传播过程中,由于树木等构成的多散射环境,电磁波产生严重的多径效应,将经历多次反射、折射和绕射等。丛林中电磁研究常用的方法主要有 3 种。第一种是实际测量的方法,即通过实际测量得到大量数据,并对所得数据进行分析,最后得出树林对电波传播统计模型;二是等效处理的方法,即将树林或植被等效为一种介质,采用电波在不同媒质分界面处的传播理论进行求解;三是利用散射场的分析方法求解,即将树林看作随机离散的介质进行处理。

随着宽带数字通信的迅速发展和理论成果的不断丰硕,研究人员在丛林环境中开展了大量的试验工作,得到了大批的试验数据。基于这些试验数据,一些新的基于实际测量而建立的丛林环境下电波传播模型也相继被提出,比如著名的奥村-哈塔模型。同时,许多学者也开始尝试使用不同的途径实现对丛林电磁模型的研究,比如通过并矢介电常数研究丛林中的数字

脉冲信号的电波传播路径损耗,采用散射方法、格林函数法以及分形和蒙特卡罗方法等进行相关模型的计算。由于环境的复杂性,目前关于丛林中电磁研究和应用仅限于丛林多散射环境中通信电波信号的传播建模^[74-75],对于丛林中隐蔽目标的探测和成像目前还非常有限。对于复杂多散射的丛林环境下隐蔽目标探测的电磁成像算法,目前还鲜有文献报道,国外的研究也是处于最初的模拟阶段。本书采用间接 Z 变换时域有限差分法对电磁照射下多散射环境中目标的场分布进行仿真,并根据仿真数据进行初步的成像研究。

1.2.3 合成孔径雷达及动目标检测技术的研究进展

目标微动对 SAR 成像、目标特征提取带来的影响可以概括为:一是目标微动将使 SAR 图像上出现诸如灰色条带(gray strip)、杂乱线条(disordered line)、鬼影假像(ghost image)、栅栏(fence)等特征^[76-79],将严重污染 SAR 图像,使其难以解读,但反过来则可利用目标微动对回波相位的复杂调制作用实现对静止目标和运动目标的压制或欺骗性干扰^[80-82],用来遮蔽重要的民用或军事目标(例如机场跑道等)。图 1.1(a)所示为某次机载 SAR 试验中所录取的机场实测数据,图 1.1(b)所示为旋转角反射器沿距离向排列(间隔 5m)的干扰 SAR 图像,可以看出旋转角反射器已几乎将机场图像完全遮盖^[82]。二是目标微动激励的微多普勒效应可视为目标结构部件与主体之间相互作用的结果,它是该目标所具有的独特特征,能使我们确定目标的一些性质,完成对特殊目标的分类、识别与成像。

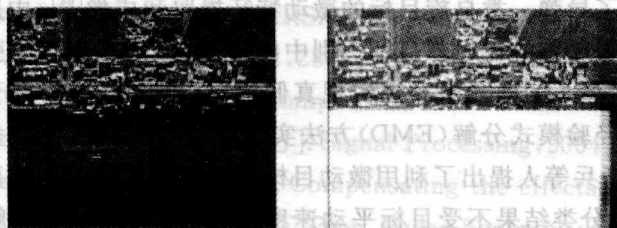


图 1.1 压制干扰前、后机场 SAR 成像比较

(a) 某机场 SAR 成像结果; (b) 旋转角散射器的压制干扰结果

1. 国外研究进展

(1) 对空间和空中军事目标(弹道导弹、空间碎片、直升飞机等)的微多普勒现象研究。美国 MIT 林肯实验室研究了宽带雷达数据分析技术和弹道导弹防御识别算法的演化,并指出基于带宽外推技术的微动特征提取将是弹道导弹防御系统的研究重点^[83]。美国的 X 波段 GBR 雷达已经具备了微动特征提取及识别功能,这为其弹道导弹防御系统提供了极具潜力的目标识别手段。但由于技术的军事敏感性,其具体技术细节未见报道。S. L. Marple^[84]等人使用 X 波段雷达照射 BO-105 直升机,在信噪比相差 70dB 的动态范围内采用高分辨时频变换有效提取了主旋翼和尾翼的微多普勒成分。J. Li^[85]等人利用 chirplet 分解方法成功地分离了微多普勒信号与飞机主体回波信号,获得了清晰的飞机主体 ISAR 像。文献^[86]介绍了采用小波变换和自相关函数分布的方法成功提取了悬停直升机的 X 波段微多普勒信号及其微动

周期。文献[87]指出可利用 Mi-24“雌鹿”D型直升飞机喷气式发动机调制(Jet Engine Modulation, JEM)的微多普勒特征来估计涡轮叶片的个数和旋转频率。

(2)对地面目标(如行人、汽车、坦克等)的微多普勒现象研究。A. Ghaleb^[88]等人通过实验研究了普通汽车行驶时车轮转动的微多普勒效应,成功观测到了汽车前轮和后轮不同的微多普勒特征。英国 Thales 公司开发了基于微多普勒特征的单兵便携式监测跟踪雷达(MSTAR)^[89],对行人、轮式车和履带车三类目标分类的正确率超过了 80%。文献[90]指出将微多普勒效应扩展到多基雷达体制下,多基配置可以提供更丰富的微多普勒信息,利于对人体目标的自动识别。文献[91]介绍了基于时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)模拟分析了隔墙人体的微多普勒信号,研究表明微波穿墙传播对于微多普勒特征的影响很小,有望用于震后生命探测和救援等领域。文献[92]介绍了基于 HHT(Hibert-Huang Transform)和经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)的方法有效提取了较小振幅卡车目标的微多普勒信号,其时频分辨率优于 Cohen 类二次型时频分布。

2. 国内研究进展

国内近两年来关于微多普勒效应的研究也逐渐开始深入,并在微多普勒特征提取、微动目标成像、微动目标识别等方面取得了较多成果。例如:国防科技大学的陈行勇等人对微动目标雷达特征提取做了较为深入的研究,并提出了微雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的概念^[93];北京理工大学的李宝柱研究员等人通过构造指数为正弦函数的基函数,采用匹配傅里叶变换方法实现了导弹一类自旋目标的微动特征提取和成像^[94];中航二院的谢良贵教授等人着重研究了微多普勒效应在导弹目标识别中的应用,分析了弹道导弹目标的进动和章动特性,并利用其与诱饵弹头的微动差异来实现真假目标识别^[95];西安电子科技大学的刑孟道教授等人提出了利用经验模式分解(EMD)方法实现含旋转部件目标微多普勒特征提取及主体成像的方法^[96],李彦兵等人提出了利用微动目标回波特征谱来识别地面轮式车辆和履带式车辆的方法,指出目标分类结果不受目标平动速度变化的影响^[97];北京航空航天大学的许小剑教授等人从雷达目标散射截面和高分辨一维距离像时间序列两方面对空间进动目标的宽带雷达特征信号做了详细研究,并由微波暗室数据予以验证^[98]。

参 考 文 献

- [1] 底青云,王岩. 可控源音频大地电磁数据正反演及方法应用[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [2] Qing Anyong. MUSIC Imaging and Electromagnetic Inverse Scattering of Multiple-Scattering Small Anisotropic Spheres [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2007, 55(12).
- [3] 黄卡玛,赵翔. 电磁场中的逆问题及应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [4] 郑明洁. 合成孔径雷达运动目标检测和成像研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2003.
- [5] 孙娜,周荫清,李景文. 基于 ATI 技术的一种动目标检测的实现方法[J]. 北京航空航天

- 大学学报,2004,30(12):1147-1150.
- [6] 高飞,毛士艺,袁运能,等.基于原始数据域的星载双通道 SAR-GMTI 研究[J].电子学报,2005,33(12):2105-2110.
- [7] 盛蔚,毛士艺.一种 SAR/GMTI 空频联合处理杂波抑制技术的研究[J].电子学报,2005,33(6):970-973.
- [8] 李真芳,保铮,杨凤凤.基于成像的分布式卫星 SAR 系统地面运动目标检测(GMTI)及定位技术[J].中国科学 E 辑(信息科学),2005,35(6):597-609.
- [9] 李亚超,李晓明,刑孟道,等.天线斜置情况下三通道 SAR-GMTI 技术研究[J].电子与信息学报,2009,31(3):578-582.
- [10] 蔚婧,廖桂生,杨志伟. InSAR 构型下的分布式卫星 GMTI 性能分析[J].宇航学报,2009,30(5):2037-2042.
- [11] 邓海涛,张长耀.一种机载三通道 GMTI 实时信号处理方法[J].电子与信息学报,2009,31(2):370-373.
- [12] 张云.高分辨 SAR 运动目标检测与成像若干技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [13] 钱江,吕孝雷,刑孟道等.机载三通道 SAR/GMTI 快速目标运动参数估计[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2010,37(2):235-241.
- [14] Livingstone C E, Sikaneta I, Gierull C H, et al. An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI) [J]. *Can. J. Remote Sensing*, 2002, 28(6):794-813.
- [15] Sikaneta I C, Chouinard J Y. Eigendecomposition of the multi-channel covariance matrix with application to SAR-GMTI [J]. *Signal Processing*, 2004, 84:1501-1535.
- [16] Sharma J J, Gierull C H, Collins M J. Compensating the effects of target acceleration in dual-channel SAR-GMTI [J]. *IEE Proc. Radar Sonar Navigation*, 2006, 153(1):53-62.
- [17] Banahan C P, Perks D, Baker C, et al. GMTI clutter cancellation using real non-ideal data [J]. *IET Radar Sonar Navigation*, 2010, 4(2):302-314.
- [18] Maori D C, Gierull C H, Ender J H G. Experimental verification of SAR-GMTI improvement through antenna switching [J]. *IEEE Trans. on GRS*, 2010, 48(4):2066-2075.
- [19] Chen V C, Li F Y, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model and simulation study [J]. *IEEE Trans. on AES*, 2006, 42(1):2-21.
- [20] Chen V C, Ling H. Time-frequency transforms for radar imaging and signal analysis [M]. Boston: Artech House, 2002.
- [21] Sparr T, Krane P. Micro-Doppler analysis of vibrating targets in SAR [J]. *IEE Proc. Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(4):277-283.
- [22] Thayaparan T, Abrol S, Qian S. Micro-Doppler analysis of rotating target in SAR [R]. TM 2005-204, Ottawa: Defence R&D Canada-Ottawa, 2005.
- [23] 庄钊文,刘永祥,黎湘.目标微动特性研究进展[J].电子学报,2007,35(3):520-525.

- [24] Isernia T, Pascazio V, and Pierri R. On the local minima in a tomographic imaging technique[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 39, no. 7, pp. 1596 - 1607, Jul. 2001.
- [25] Pierri R and Leone G. Inverse scattering of dielectric cylinders by a second-order Born approximation[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1999, 37(1): 374 - 382.
- [26] Belkebir K and Tijhuis A G. Modified gradient method and modified born method for solving a two-dimensional inverse scattering problem[J]. *Inv. Probl.*, 2001, 17: 1671 - 1688.
- [27] 王卫延, 张守融. 电磁逆散射非相关照射法的普遍公式[J]. *电子科学学刊*, 1996(4): 415 - 421.
- [28] Kleinman R E, Van den Berg P M. A modified gradient method for two-dimensional problems in tomography[J]. *J. Comput. Appl. Math.*, 1992, 42: 17 - 35.
- [29] Kleinman R E, Van den Berg P M. Two-dimensional location and shape reconstruction[J]. *Radio Science*, 1994, 29(4): 1157 - 1169.
- [30] Rocco Pierri, Raffaele Solimene, Angelo Liseno and Jessica Romano. Linear Distribution Imaging of Thin Metallic Cylinders Under Mutual Scattering[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat.*, 2005, 53(9).
- [31] Xiao F, Yabe H. Microwave imaging of perfectly conducting cylinders from real data by micro genetic coupled with deterministic method[J]. *IECE Trans. Electron.*, 1998, E81 - C(12): 1784 - 1792.
- [32] Meng Z Q, Takenaka T, Tanaka T. Image reconstruction of two-dimensional impenetrable objects using genetic algorithm[J]. *J. Electromagn. Waves Appl.*, 1999, 13: 95 - 118.
- [33] Caorsi S, Massa A, Pastorino M. A computational technique based on a real-coded genetic algorithm for microwave imaging purposes[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, 38(4): 1697 - 1708.
- [34] Qing A. Electromagnetic inverse scattering of multiple two-dimensional perfectly conducting objects by the differential evolution strategy[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 2003, 51(6): 1251 - 1262.
- [35] Huang Tony, Sanagavarapu Ananda. A Microparticle Swarm Optimizer for the Reconstruction of Microwave Images[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2007, 55(3): 568 - 576.
- [36] Matteo Pastorino. Stochastic Optimization Methods Applied to Microwave Imaging: A Review[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2007, 55(3).
- [37] Ahmad F, Amin M G, Kassam S A. Synthetic Aperture Beamformer for Imaging Through a Dielectric Wall [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(1): 271 - 283.
- [38] Beerl A, Daisy R. High-resolution Through-wall imaging[C]. *Proceedings of SPIE on Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies*