

国防科技图书出版基金



超宽带 地表穿透成像雷达

Ultrawideband Ground
Penetrating Imaging Radar

■ 周智敏 金添 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金



超宽带 地表穿透成像雷达

Ultrawideband Ground
Penetrating Imaging Radar

■ 周智敏 金添 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

超宽带地表穿透成像雷达 / 周智敏等著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 3

ISBN 978 - 7 - 118 - 08558 - 7

I. ①超... II. ①周... III. ①超宽带雷达 - 研究
IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 039280 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)
北京嘉恒彩色印刷责任有限公司
新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 字数 312 千字
2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 76.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777
发行传真: (010)88540755

发行邮购: (010)88540776
发行业务: (010)88540717



周智敏，博士，国防科技大学电子科学与工程学院教授。中国电子学会高级会员，中国电子学会无线电定位技术分会副主任委员，中国电子学会空间电子学分会委员，中国宇航学会湖南省宇航学会副理事长，《雷达科学与技术》期刊编委，《先进雷达探测技术》期刊编委，《现代雷达》理事会常务理事，国防科技大学科技委委员，国家科学技术奖评审专家，全军武器装备科技奖评审委员。发表学术论文百余篇。获全国优秀科技工作者荣誉称号。获中国人民解放军杰出专业技术人才奖，获军队院校育才奖金奖。享受国务院特殊津贴。主要研究方向为新体制雷达技术，主持完成了多项国防科研课题，获国家科技进步奖、军队科技进步奖共10余项。



金添，博士，国防科技大学电子科学与工程学院副教授。2009年全国优秀博士学位论文获得者，入选2010年度教育部新世纪优秀人才支持计划，“信号处理与分析”国家精品课程主讲教师，信号处理系列课程国家级教学团队主要成员。长期从事新体制雷达系统、雷达成像与目标识别、现代信号处理等方面的科研和教学工作。已出版专著1部，发表学术论文100余篇，其中SCI检索21篇、EI检索79篇。获军队科技进步一等奖1项、二等奖1项。曾担任2009年亚太合成孔径雷达(APSAR)国际会议、2011年CIE国际雷达会议分会主席。



王建，博士，国防科技大学电子科学与工程学院讲师。长期从事新体制雷达系统、雷达成像信息处理等方面的科研和教学工作。发表学术论文20余篇，获军队科技进步一等奖1项、二等奖1项。



李杨寰，博士，国防科技大学电子科学与工程学院讲师。2010年获得国防科技大学工学博士学位。长期从事雷达成像、目标识别与导航定位方面的科研工作，发表学术论文20余篇，参与多项国防预研课题研究，获军队科技进步一等奖1项。



宋千，博士，国防科技大学电子科学与工程学院研究员。长期从事超宽带雷达系统和信息处理技术、实时信号处理等方面的科研和教学工作，主持和参与了多项重点武器装备型号分系统的研制，担任总装备部某专业组专家，获国家科技进步奖1项，军队科技进步奖5项。出版教材1部，发表学术论文60余篇。



图 1.2(d)

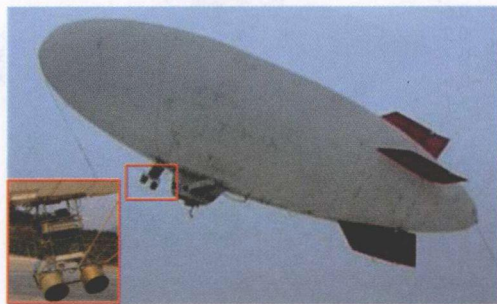
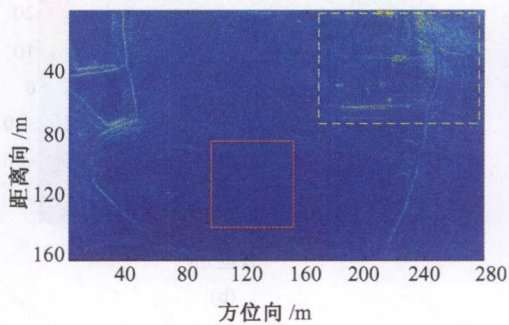


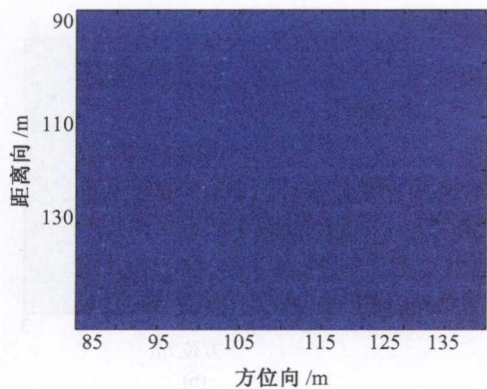
图 1.8



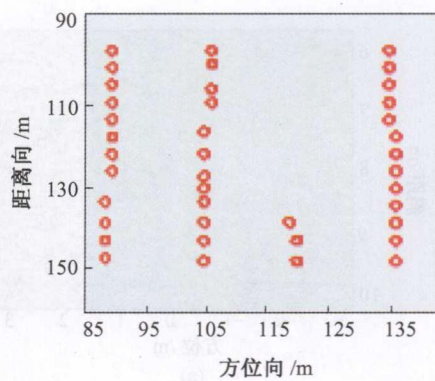
(a)



(b)



(c)



(d)

图 2.21

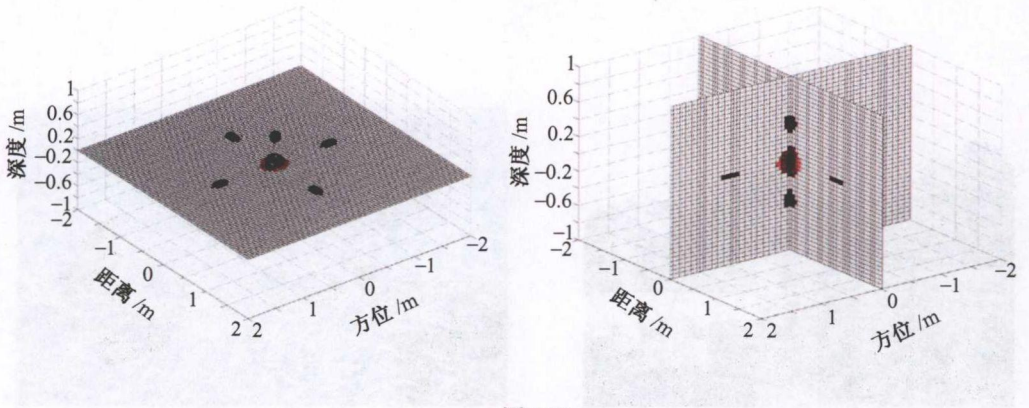


图 3.38

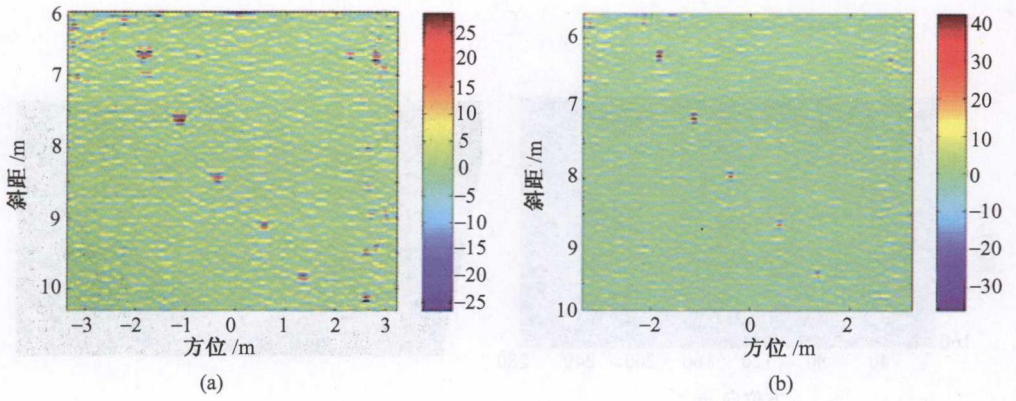


图 4.6

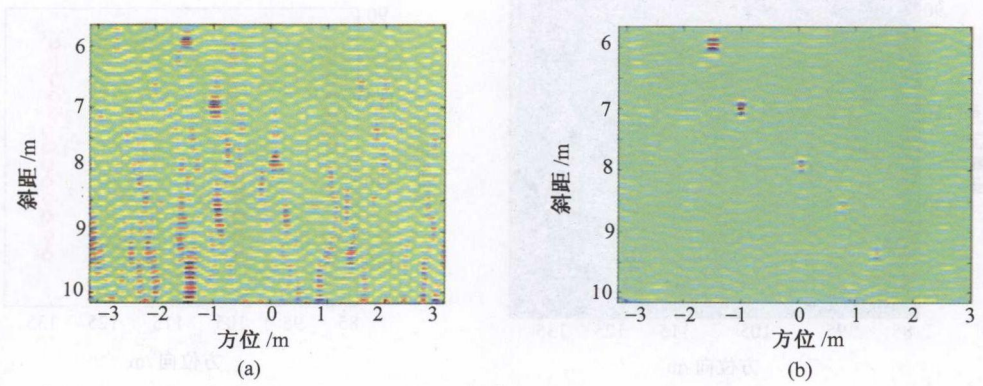


图 4.12

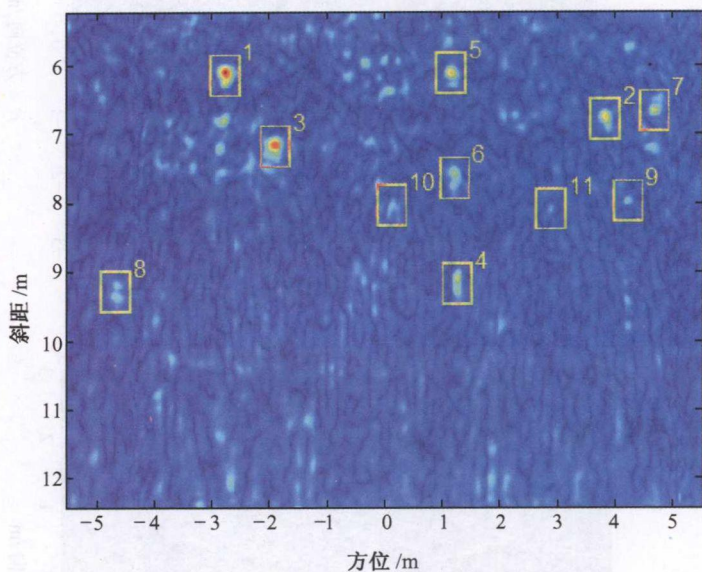


图 5.17

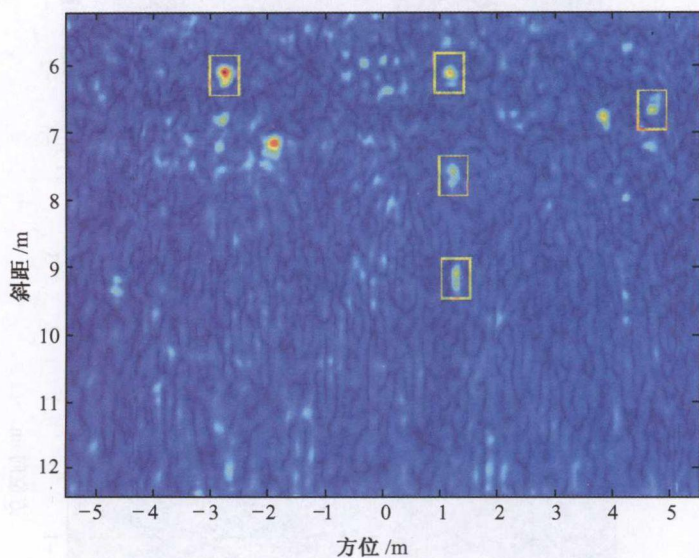


图 5.21

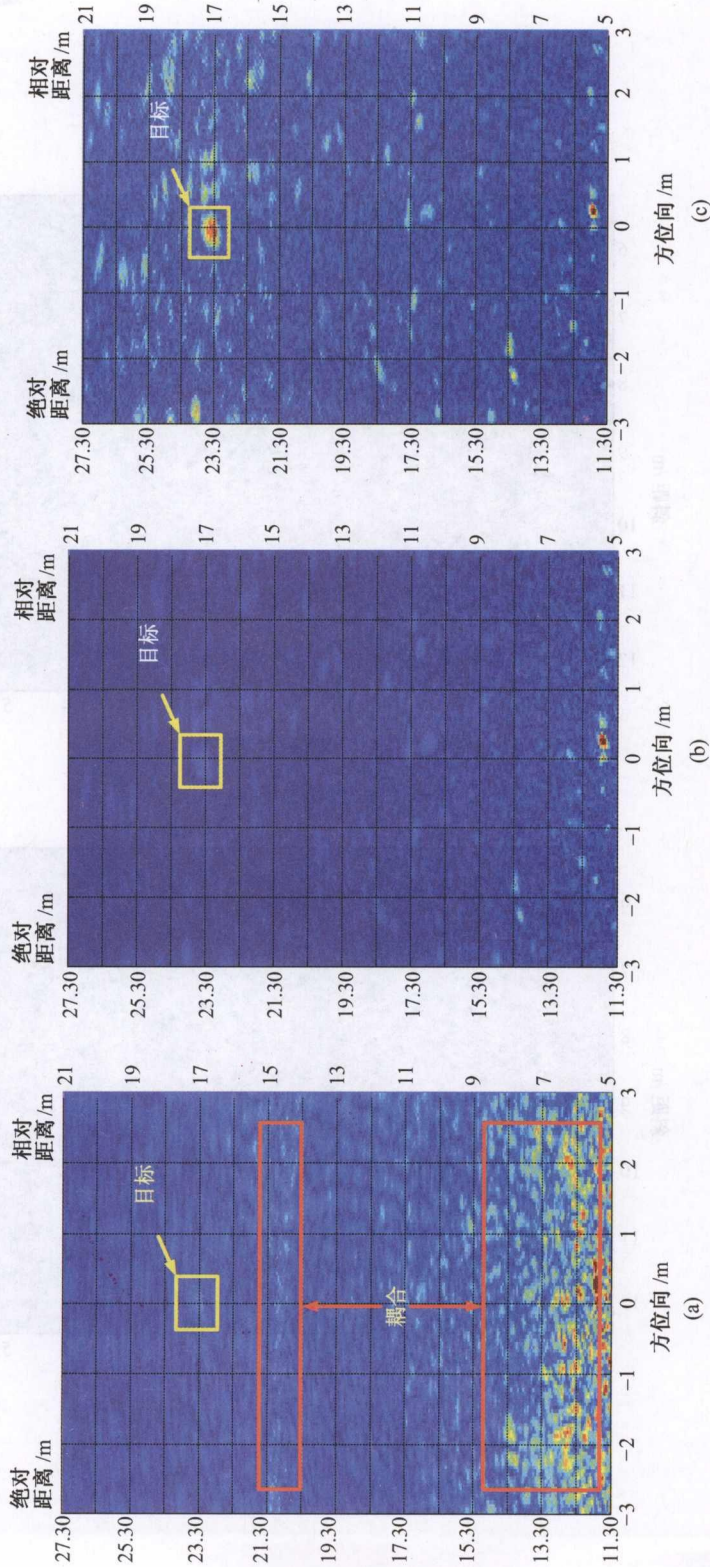


图 6.8

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镛 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 才鸿年 马伟明 王小漠 王群书
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 陆 军 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟

肖志力 吴宏鑫 张文栋 张信威

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

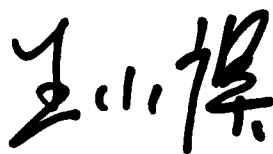
序 言

超宽带地表穿透成像雷达结合了超宽带技术和雷达成像技术的优势,能够远距离对浅地表目标进行成像探测,可工作在机载侧视或车载前视模式,用于大面积区域的地雷和雷场清除,具有安全、高效和准确等优点,已成为探雷装备的重要发展方向。

地雷尺寸相比车辆等目标小得多,加之电磁波穿透土壤带来的衰减,使雷达接收到的地雷回波强度弱;地雷布设环境复杂多样,杂波背景较强,因此如何获取高质量的地雷图像,如何提取稳健的地雷特征,以及如何剔除杂波虚警干扰等问题是制约超宽带地表穿透成像雷达实用化的瓶颈。

国防科技大学周智敏教授和他带领的团队,长期从事超宽带成像雷达系统与信息处理技术研究,取得了突出成绩,研制成功了国内首部机载和车载超宽带地表穿透成像雷达。本书在总结了超宽带地表穿透成像雷达系统发展现状的基础上,对合成孔径和虚拟孔径成像方法、浅地表成像处理与干扰抑制、地雷目标特征提取与检测鉴别等方面的内容进行了详细介绍,针对若干问题提出了许多新方法,并在实际应用中得到了检验。

目前,国内外尚没有一本系统介绍超宽带地表穿透成像雷达原理和信息处理方法的专著,相信本书的出版会对雷达及相关专业的教学、对雷达领域的科研人员和工程技术人员都起到很好的参考作用。



2013年1月

前 言

各种地雷及防御工事混合构成的浅埋雷场对人员和军事装备具有很大的杀伤力,会极大地降低部队的快速机动能力;而战争环境中的遗留地雷和未爆危险物也严重威胁着人们的生命安全。下视地表穿透雷达作为传统浅埋目标探测手段效果不错,但它最大的缺点是效率和安全性不高。因为下视地表穿透雷达在使用时需要将传感器贴近地面,因而天线照射范围有限,同时近距离探测容易造成操作人员伤亡。据专家估计,在世界各国遗留的地雷大约有 1.1 亿颗,导致每年有超过 2 万平民死亡或致残,利用下视地表穿透雷达一类设备大约需要 1100 年才能完全清除遗留在世界各地的地雷。因此,寻求一种快速、高效、准确的浅埋地雷和未爆物探测手段是亟待解决的问题。

超宽带成像雷达将超宽带技术与雷达成像技术相结合,能够获得浅埋目标的二维高分辨率图像,从而提高目标的检测鉴别性能。此外,超宽带成像雷达利用机载或车载平台可以进行远距离侧视或前视探测,能够满足浅埋地雷和未爆物探测对快速、高效、准确的要求,具有广阔的应用前景。

本书作者长期从事超宽带成像雷达系统和信息处理技术的研究,研制了国内首部机载和车载超宽带地表穿透成像雷达,成功应用于对浅埋地雷和未爆物的远距离、快速探测。本书是我们近几年研究工作的总结,主要包括超宽带地表穿透成像雷达的基本原理、典型算法和信息处理关键技术。全书共 6 章,具体内容和章节安排如下:

第 1 章是概述,主要介绍超宽带地表穿透成像雷达的原理,对比分析了合成孔径和虚拟孔径两种成像体制的特点,最后对超宽带地表穿透成像雷达信息处理的难点进行了分析和归纳。

第 2 章是超宽带合成孔径成像技术,主要研究合成孔径后向投影算法及其各种快速实现技术,并研究了圆迹合成孔径三维成像算法。

第 3 章是超宽带虚拟孔径成像技术,主要研究虚拟孔径后向投影算法及其快速实现,并研究了平面孔径三维成像算法和三维超分辨成像技术。

第 4 章是超宽带浅地表成像算法及其干扰抑制技术,主要针对土壤对电磁波的折射和色散、射频干扰、相干斑噪声干扰和虚拟孔径中的多通道误差研究了干扰抑制和误差校正技术。

第 5 章是浅埋目标电磁建模和特征提取技术,主要研究了浅埋地雷目标电磁建模方法和特征提取方法。

第6章是浅埋目标检测和鉴别方法,主要内容包括基于恒虚警率及其改进形式的预筛选方法,以及适合浅埋地雷或未爆物目标鉴别的模糊超球面支持向量机。

本书第1章由周智敏撰著,第2章由李杨寰、金添撰著,第3章由王建、金添撰著,第4章由金添撰著,第5章由周智敏、金添撰著,第6章由金添、宋千撰著。全书由周智敏筹划、指导并统稿。

本书部分研究工作是在国家自然科学基金(60972121,61271141)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0895)、全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201046)和国防科技大学科研计划项目(CJ12-04-02)等资助下进行的。本书的出版还获得了国防科技图书出版基金的资助。在写作过程中,课题组的陆必应、张汉华、孙晓坤、杨延光、施云飞、娄军、王玉明、王鹏宇、梁福来等同志也为本书提供了大量素材,在此向他们表示诚挚的谢意。

迄今为止,超宽带地表穿透成像雷达仍在不断发展,本书试图通过总结我们前期研究工作,系统论述超宽带地表穿透成像雷达的原理、算法和信息处理技术。由于作者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

著者

2013年1月

内 容 简 介

本书主要阐述超宽带地表穿透成像雷达的基本原理、算法以及信息处理技术。内容包括：超宽带地表穿透成像雷达体制、超宽带合成孔径和超宽带虚拟孔径成像算法、超宽带浅地表成像算法及干扰抑制、浅埋目标电磁建模和特征提取、浅埋目标检测和鉴别方法等。

本书可供从事雷达系统技术、雷达信号与信息处理工作的科研人员、大专院校高年级学生或研究生阅读。

This book focuses on the basic theory, algorithms, and information processing techniques of ultrawideband ground penetrating imaging radar. The primary scientific contents are the configuration of ultrawideband ground penetrating imaging radar, ultrawideband synthetic aperture and ultrawideband virtual aperture image formation, ultrawideband subsurface image formation and interference suppression, shallow buried target electromagnetic modeling and feature extraction, shallow buried targets detection and discrimination methods.

The potential readers of this book are researchers, undergraduate or graduate students on radar system technique, radar signal and information processing.

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 超宽带地表穿透成像雷达发展现状	1
1.1.1 研究背景及意义	1
1.1.2 工作模式	3
1.1.3 典型系统	4
1.2 超宽带地表穿透成像雷达信息处理关键技术	15
1.2.1 信息处理流程简介	15
1.2.2 成像算法研究现状	17
1.2.3 成像误差校正和图像增强技术研究现状	18
1.2.4 浅埋目标检测与鉴别技术研究现状	20
参考文献	23
第 2 章 超宽带合成孔径成像技术	29
2.1 合成孔径成像算法概述	29
2.2 后向投影算法及其快速实现	31
2.2.1 传统后向投影算法及其运动补偿	31
2.2.2 索引快速后向投影算法	34
2.2.3 基于因式分解的快速后向投影算法	39
2.3 基于快速后向投影算法的运动补偿方法	52
2.3.1 非均匀孔径下的多级多分辨因式分解快速后向投影	52
2.3.2 二维误差下的运动补偿	54
2.3.3 任意曲线孔径的因式分解快速后向投影算法	56
2.4 圆迹合成孔径三维成像算法	61
2.4.1 圆迹合成孔径成像模型	61
2.4.2 时域圆迹孔径成像算法	62
2.4.3 波数域圆迹孔径成像算法	64
2.4.4 仿真结果	67
2.5 本章小结	68

参考文献	69
第3章 超宽带虚拟孔径成像技术	72
3.1 虚拟孔径天线配置技术	72
3.1.1 恒速双站合成孔径雷达模型的距离特性分析	73
3.1.2 车载前视地表穿透虚拟孔径雷达的回波特性分析	79
3.1.3 车载前视地表穿透虚拟孔径雷达的图像特性分析	81
3.1.4 车载前视地表穿透虚拟孔径雷达的等效单站合成孔径 雷达模型	85
3.2 虚拟孔径后向投影算法及其快速实现	86
3.2.1 虚拟孔径后向投影算法原理	87
3.2.2 虚拟孔径快速后向投影算法原理	88
3.2.3 虚拟孔径快速后向投影算法的性能评估	97
3.3 平面孔径三维成像算法	103
3.3.1 平面孔径三维成像算法原理	104
3.3.2 基于平面孔径的原始三维后向投影算法	105
3.3.3 平面孔径三维因式分解快速后向投影算法	106
3.4 三维图像超分辨技术	109
3.4.1 三维欠秩稳健卡彭滤波器组原理	110
3.4.2 三维欠秩稳健卡彭滤波器组与级联欠秩稳健卡彭滤波器 组算法对比分析	113
3.4.3 三维欠秩稳健卡彭滤波器组与三维自适应旁瓣抑制技术、 三维正弦幅度相位估计算法对比分析	117
3.5 本章小结	119
参考文献	120
第4章 浅埋目标成像算法及干扰抑制技术	124
4.1 浅埋目标回波畸变及其对成像的影响	124
4.1.1 折射和色散引起的浅埋目标回波畸变定量分析	124
4.1.2 折射和色散对浅埋目标聚焦和定位的影响	128
4.2 土壤折射和色散影响校正方法	131
4.2.1 回波域校正方法	131
4.2.2 图像域校正方法	133
4.3 射频干扰抑制技术	138
4.3.1 射频干扰抑制方法概述	139