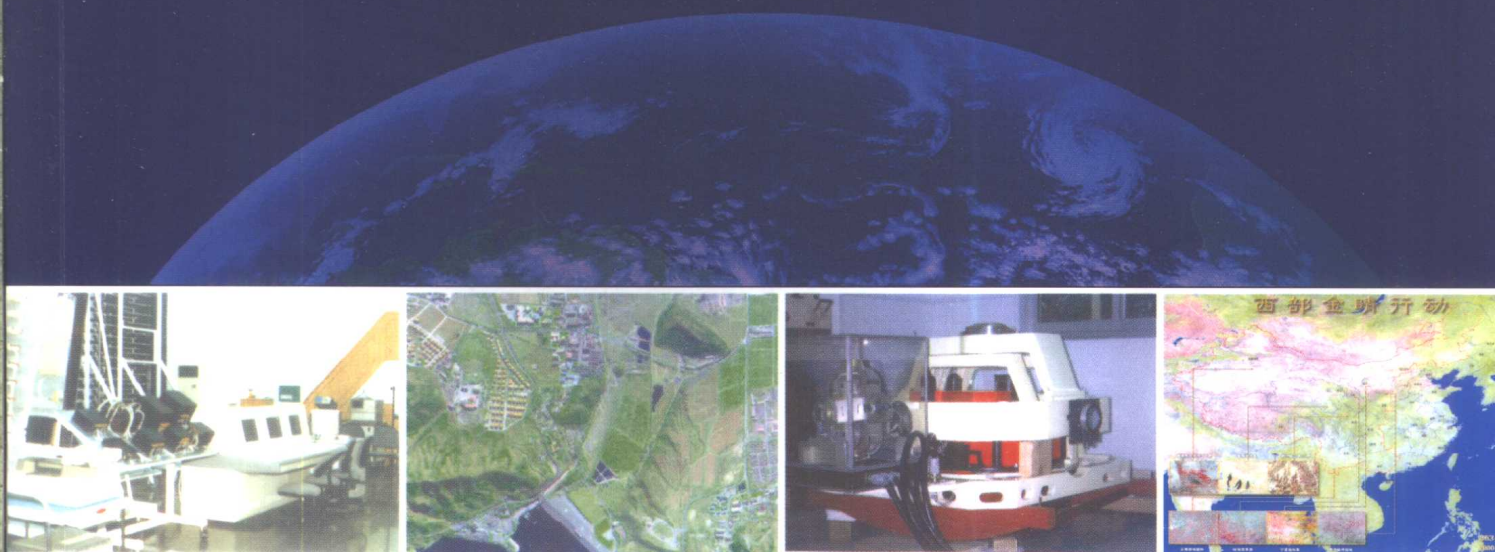


空间信息获取与处理系列专著

空间探测相控阵雷达



张光义 王德纯 华海根 倪晋麟 等著



科学出版社

空间信息获取与处理系列专著

空间探测相控阵雷达

张光义 王德纯 等著
华海根 倪晋麟

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书是国家高技术计划信息领域信息获取与处理技术(863-308)主题成果系列专著之一,是有关空间探测相控阵雷达技术的一本专著。书中系统阐述了空间探测相控阵雷达的作用、工作方式与战术技术指标分析、空间目标特征测量与识别、数据处理、有源相控阵雷达、天线、自适应波束形成以及宽带相控阵雷达等技术,反映了作者在空间探测相控阵雷达研究方面所取得的成果。

全书共分九章,第一章介绍了相控阵雷达在空间探测领域中的作用及发展现状;第二章介绍了相控阵雷达的工作方式及其战术技术指标的分析;第三章讨论卫星和弹道导弹等空间目标的特征测量与识别技术;第四章论述空间探测相控阵雷达的数据处理;第五章介绍了有源相控阵雷达技术,包括固态有源相控阵雷达发射/接收组件及其制造工艺,以及相控阵雷达接收机的设计;第六章讨论空间探测相控阵雷达的天线与馈线技术;第七章重点讨论相控阵雷达自适应数字波束形成技术;第八章介绍空间探测相控阵雷达发展的一个重要方向——宽带相控阵雷达技术;第九章讨论空间探测相控阵雷达的发展趋势。

本书可供从事雷达研究与设计的科技工作者和雷达使用人员参考,也可作为高等院校电子信息工程及信息与通信工程等专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

空间探测相控阵雷达/张光义等著. - 北京:科学出版社,2001

(空间信息获取与处理系列专著)

ISBN 7-03-009105-1

I. 空… II. 张… III. 空间探测 - 相控阵雷达 IV. TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 87551 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

西禄印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2001 年 2 月第一次印刷 印张:17 3/4

印数:1—2 000 字数:394 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(北燕))

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著

编辑委员会

名誉主编：匡定波

主 编：郭华东

副 主 编：许健民 倪国强

编 委（按姓氏笔画为序）

王长耀	王建宇	王德纯	朱敏慧	刘玉洁
刘永坦	孙文新	巫英坚	杨家德	杨震明
李小文	李文友	吴一戎	张光义	张永生
张钧屏	张意红	张澄波	郁文贤	林行刚
周心铁	郇辛樵	孟宪文	侯朝焕	姜文汉
姚岁寒	顾怀瑾	阎吉祥	龚雅谦	梁甸农
彭胜潮	景贵飞	强小哲	缪家駟	魏钟铨

国家 863 计划 308 主题

空间信息获取与处理系列专著

- 对地观测技术与可持续发展
- 合成孔径雷达卫星
- 空间探测相控阵雷达
- 对地观测与对空监视
- 航天遥感工程
- 对地观测技术与数字城市
- 对地观测技术与精细农业
- 多角度与热红外对地遥感
- 环境监测激光雷达
- MODIS 遥感信息处理原理与算法
- 对地观测系统与应用

空间信息获取与处理系列专著

序

信息获取与处理技术(308)主题是我国高技术计划最早设立的15个主题之一。20世纪80年代初,美国政府推出“星球大战计划”,接着欧洲出台了“尤里卡计划”。在亚洲,日本率先提出了“未来10年振兴科学技术政策大纲”。面对严峻的国际形势和世界的发展趋势,中国于1986年形成自己的高技术研究发展计划,明确提出308主题重点发展面向空间目标监视和空间对地观测的军民两用技术。

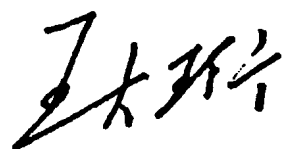
随着20世纪90年代初前苏联的解体、冷战的结束及其后“信息高速公路”、“知识经济”、“数字地球”的出现,308主题根据国际形势的发展和国家现代化建设的需要,科学地调整战略目标,卓有成效地部署实施研究计划。

15年来,308主题围绕对地观测和对空监视两大系统,突破了以新型对地观测系统星载合成孔径雷达、红外焦平面列阵成像和自适应光学为代表的六大关键技术,配套发展了超高速实时成像信息处理专用技术,取得一系列重大成果。星载合成孔径雷达等重大对地、对空关键技术成功地向国家建设主战场转移,实现了863计划与其他计划的有机衔接,带动了我国在这些领域的一系列技术进步和设备研制,开拓了我国对地观测技术和对空探测技术发展的新局面。

在863计划15年工作行将完成之际,308主题专家组决定撰写出版空间信息获取与处理系列专著,这是一项非常重要的举措:一是科研人员通过系统总结而进一步提高水平,二是可以让更多的人分享多年来的重要科研成果,三是对发展下一期的863计划建立了坚实的基础。这套系列专著的作者,包括了战略型科学家和工程

技术专家,他们长期工作在第一线,对该领域有直接的发言权。该系列专著包括 11 部书,从不同角度在不同程度上介绍了我国对地观测、对空监视高技术领域的发展,并对下一步的工作提出了设想与建议。本套专著的出版,是我国信息获取领域的一件大事,有重要的学术和实用意义。

我高兴地向读者们推荐这套高技术领域的系列专著。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Wang Dazhong, the author of the preface.

2001 年 2 月

空间信息获取与处理系列专著

前 言

新世纪到来之际,我国的 863 计划——高技术研究发展计划,历经 15 年的辉煌,将完成第一期庄严的历史使命。863 计划信息领域信息获取与处理技术主题,经过各级领导和五届专家组及全体参研人员的共同努力,也圆满地实现了她的预期目标。

作为 863 计划信息领域 4 个主题之一的“信息获取与处理技术主题”,1986 年立题伊始即明确其战略目标:发展各种信息获取与处理技术,重点是掌握高速、高精度的新型信息获取和实时图像处理技术,促进信息技术在各个领域的应用。1990 年提出,在重视对空监视的基础上,加强对地观测;1993 年进一步提出,在重视星载对地观测的同时,加强机载对地观测技术的发展。进入“九五”,进一步凝炼战略方向:以中国数字地球战略空间信息资源重大需求为导向,研究发展对空、对地观测技术,形成具有我国自主知识产权的实用化机载对地观测技术系统,开展数字图像处理及信息挖掘方法研究,研究对地观测小卫星有效载荷及卫星数据处理技术,进行应用示范,为我国数字地球战略铺垫基础,为国家可持续发展、国家安全战略服务。

15 年来,308 主题五届专家组在国家科技部领导下,依靠来自 20 多个部、委,分布在 19 个省、区、市的 61 个单位 3000 余名科技人员的精诚奉献,围绕对地观测与对空监测两大系统,突破 7 项关键技术,探索信息获取前沿,取得机载对地观测系统技术、星载合成孔径雷达技术、自适应光学望远镜技术等四大标志性成果;获得 X-SAR 系统样机、SAR 实时成像器、激光测污雷达、激光测风雷达、对地观测小卫星相机、MODIS 接收处理系统、InSb 红外焦平面组件及逆合成孔径雷达等 8 项代表性重点成果;在前沿信息获取方面,取

得新型光学传感器、聚束雷达、微型自适应光学技术等 5 类成果。成功开展机载对地观测系统应用示范,在城市、农业应用等领域取得显著成效,及时开展了“九八”抗洪、“九九”澳门回归、“西部金睛行动”和中关村科技园区遥感飞行等服务国家重大需求的专项。这些成果提高了我国信息获取与处理技术领域发展水平,缩短了我国在该领域与世界先进水平的差距,为国民经济建设、国家安全战略做出重要贡献。

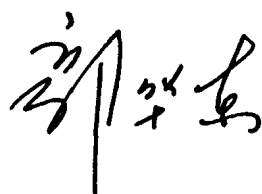
在 15 年研究即将完成之际,对长期以来的科研成果进行科学的、系统的总结,这对未来发展十分有益,为此我们决定出版这套空间信息获取与处理系列专著。本系列书由 11 部著作组成,书名分别是:《对地观测技术与可持续发展》、《合成孔径雷达卫星》、《空间探测相控阵雷达》、《对地观测与对空监视》、《航天遥感工程》、《对地观测技术与数字城市》、《对地观测技术与精细农业》、《多角度与热红外对地遥感》、《环境监测激光雷达》、《MODIS 遥感信息处理原理与算法》及《对地观测系统与应用》。对地观测内容构成本系列书的主体,介绍了对地观测原理、技术、应用与发展;侧重论述 308 主题近年来研究发展的光学传感器、成像雷达系统、信息处理方法及其在城市、农业、环境、资源、灾害等领域的应用,提出了 21 世纪初以可持续发展为牵引发展对地观测技术的建议及战略思考;空间监视内容是本系列书的又一重要方面,概述了空间目标探测与监视技术,介绍了空间探测相控阵雷达技术;激光雷达是信息获取技术的前沿领域之一,书中阐述了环境监测激光雷达原理与技术。

我们期望,这套专著能起到理论总结的作用、学术交流的作用;同时,我们也期望着她能对下一期国家高技术发展起到有益的参考作用。

15 年来,信息获取与处理技术主题工作受到科技部、科技部高新技术司、863 联合办公室、信息领域办公室各级领导的大力支持,得到各承研单位及课题组和关心 308 主题同志们的全力支持,在此谨代表主题五届专家组向以上领导与同志们致以真诚的谢意。诚然,没有大家的支持,本系列书也不可能问世,值此系列专著出版之际,向大家表示衷心的感谢。863 计划发起者之一的王大珩院士在百忙之中亲自为系列专著作序,我们向推动我国高技术计划的元勋

王大珩先生致以崇高的敬意。11部专著的数十位作者都是工作在863计划第一线的优秀科学家,在繁忙的工作之余,他们将高技术成果进行理论总结,为国家高技术“书写”奉献,亦特向各位辛勤的作者致以敬意。在本系列专著出版时又受到科学出版社的鼎力相助,特别是姚岁寒等先生付出了十分艰辛的劳动,谨此一并鸣谢。

系列专著不久将与大家见面了,鉴于水平与时间所限,书中不妥乃至错误之处在所难免,恳望读者不吝批评指正。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters, likely '姚岁寒' (Yao Suihan).

2001年元月

前 言

空间技术对国民经济、国防建设、科学研究都有重要作用。空间探测相控阵雷达在空间技术的发展中有着重要作用。自 1957 年 10 月前苏联发射了第一颗人造卫星后,空间技术发展极其迅速,很多国家都制定了相应的空间发展计划,特别是美国、前苏联发射了大量的人造卫星、空间探测器、载人航天器等空间目标。对空间目标的预警探测、跟踪测量、分类识别、编目等也成了空间活动的一项重要内容。由于对空间探测的突出要求是:作用距离远(数千公里)、数据率和测量精度高、跟踪目标数目多,因此,空间目标探测通常采用相控阵雷达技术,特别是固态有源相控阵雷达技术。

在国家高技术研究发展计划等的支持下,南京电子技术研究所(NRIET)等单位在空间探测相控阵雷达方面开展了多项研究工作。本书系统阐述了空间探测相控阵雷达的作用、工作方式与战术技术指标分析、空间目标特征测量与识别、数据处理、有源相控阵雷达、天线、自适应波束形成以及宽带相控阵雷达等技术,反映了上述研究成果。

全书共分为九章。第一章空间探测与相控阵雷达,介绍了空间技术发展及对天探测的要求、用于卫星和弹道导弹探测的相控阵雷达总体性能及其发展现状;第二章讨论了相控阵雷达用于空间探测的工作方式,包括搜索、跟踪、能量管理、测速等工作方式,并对其战术技术指标进行了详细分析;第三章介绍空间目标特征测量和识别技术;第四章讨论空间探测相控阵雷达的数据处理,着重介绍确定空间目标轨道、轨道预测、滤除测量误差的方法;第五章介绍有源相控阵雷达技术,特别是对其关键部件发射/接收组件的原理、工程设计、制造工艺及相控阵雷达接收机设计进行了详细介绍;第六章讨论空间探测相控阵雷达的天线与馈线技术,并对幅相测量与校正技术、天线馈线一体化设计技术进行了介绍;第七章系统论述自适应数字波束形成技术,探讨了系统误差对自适应数字波束形成性能的影响,以及空间谱估计等;第八章介绍了空间探测相控阵雷达的一个重要发展方向——宽带相控阵雷达技术;第九章讨论空间探测相控阵雷达技术的发展趋势。

本书由张光义、王德纯、华海根、倪晋麟等著。其中,第一章由李治铭、冯荣林、华海根、赵玉洁撰写;第二章由张光义、华海根撰写;第三章由王德纯撰写;第四章由徐振来撰写;第五章由华海根、陈振成、丁友石、郭崇贤撰写;第六章由束咸荣、殷连生撰写;第七章由倪晋麟撰写;第八章由王德纯、张光义撰

写;第九章由张光义、赵玉洁撰写。全书由张光义、王德纯、华海根、倪晋麟审定。在本书撰写过程中得到了南京电子技术研究所所长左群声等所领导的大力支持,赵玉洁、王炳如、朱家昌、叶渭川、李天泉承担了本书的大量编辑工作,张文勇、谷静等同志为本书打印、制图做了大量工作,在此表示诚挚的感谢。

本书可以作为从事雷达技术与开发的科研工作者参考,也可以作为高等院校电子信息工程专业以及信息与通信工程学科的教师、学生参考用书。由于空间探测相控阵雷达技术发展很快,加上作者水平有限,书中难免存在不足和错误,殷切希望广大读者提出批评指正。

作 者

2000年10月

目 录

第一章 空间探测与相控阵雷达	(1)
§ 1.1 空间技术的发展与对天探测的要求	(1)
1.1.1 前言	(1)
1.1.2 空间航天器类别与作用	(1)
1.1.3 空间技术发展概况	(2)
1.1.4 军用航天器发展概况	(3)
1.1.5 探测的需求	(5)
§ 1.2 卫星目标监视相控阵雷达	(6)
1.2.1 任务	(6)
1.2.2 军事卫星特性	(7)
1.2.3 雷达设计考虑	(8)
§ 1.3 弹道导弹预警相控阵雷达	(9)
1.3.1 弹道导弹预警系统	(9)
1.3.2 弹道导弹预警相控阵雷达	(11)
§ 1.4 空间目标探测相控阵雷达发展现状	(12)
1.4.1 美国、前苏联的空间探测雷达系统	(12)
1.4.2 美国、前苏联空间探测相控阵雷达技术现状	(14)
第二章 相控阵雷达的战术技术指标与工作方式	(20)
§ 2.1 空间探测相控阵雷达的主要战术指标	(20)
2.1.1 雷达观测空域	(20)
2.1.2 处理多目标的能力	(24)
2.1.3 雷达的分辨率	(25)
2.1.4 雷达测量参数	(25)
2.1.5 雷达测量精度	(26)
2.1.6 雷达在复杂电磁环境条件下的工作能力与雷达的生存能力	(27)
2.1.7 雷达的使用环境及使用性能	(27)
§ 2.2 空间探测相控阵雷达的主要技术指标	(27)
2.2.1 波段选择	(27)
2.2.2 相控阵天线方案的选择	(29)
2.2.3 雷达信号波形的选择	(33)
2.2.4 雷达发射机型式的选择	(34)
2.2.5 测角方法	(35)
§ 2.3 空间探测相控阵雷达的搜索与跟踪工作方式	(35)
2.3.1 空间探测相控阵雷达的数据率	(35)

2.3.2 相控阵雷达的搜索方式	(36)
2.3.3 相控阵雷达的跟踪工作方式	(39)
§ 2.4 空间探测相控阵雷达信号的能量管理	(44)
2.4.1 按目标远近及其 RCS 大小的信号能量管理	(45)
2.4.2 搜索和跟踪状态之间的信号能量分配	(45)
2.4.3 波束驻留数目 N 的选择与信号能量管理	(46)
§ 2.5 空间探测相控阵雷达的测速工作方式	(48)
§ 2.6 空间探测相控阵雷达的宽带信号工作方式	(51)
2.6.1 宽带信号工作方式的应用	(51)
2.6.2 宽带信号工作方式的关键技术	(51)
2.6.3 高分辨相控阵雷达的分辨率	(52)
2.6.4 宽带高分辨信号的系统补偿问题	(52)
第三章 空间目标特征测量和识别技术	(53)
§ 3.1 概述	(53)
3.1.1 雷达目标识别的一般原理	(53)
3.1.2 雷达目标特征识别的一般方法	(55)
§ 3.2 空间目标的雷达特性	(57)
3.2.1 空间目标的轨道及动力学特性	(57)
3.2.2 空间目标的电磁散射特性	(60)
§ 3.3 卫星目标的特征测量与识别	(63)
3.3.1 窄带雷达的目标特征测量与识别	(63)
3.3.2 宽带雷达的特征测量与分类技术	(67)
§ 3.4 弹道导弹的特性测量与识别技术	(69)
第四章 空间探测相控阵雷达数据处理	(72)
§ 4.1 空间探测相控阵雷达数据处理的任务	(72)
§ 4.2 参考系及卫星运动方程	(73)
4.2.1 惯性坐标系	(74)
4.2.2 时间系统	(74)
4.2.3 卫星运动的微分方程	(76)
§ 4.3 椭圆轨道的特征——轨道根数	(78)
4.3.1 微分方程的解(1)——轨道平面参数与面积速度	(78)
4.3.2 微分方程的解(2)——轨道椭圆参数	(81)
4.3.3 微分方程的解(3)——过近地点的时刻参数	(85)
§ 4.4 用相控阵雷达的测量数据确定卫星轨道	(89)
4.4.1 雷达测量数据与惯性坐标	(89)
4.4.2 惯性坐标与轨道根数	(91)
§ 4.5 卫星运动的预测	(95)
4.5.1 预测未来某一时刻卫星相对于雷达站的位置	(95)
4.5.2 预测未来某一时刻卫星所处位置的经度、纬度和高度	(97)

4.5.3	卫星预报	(99)
4.5.4	导弹预报	(100)
§ 4.6	消除雷达的测量误差	(101)
4.6.1	数据的合理性检验	(101)
4.6.2	数据平滑	(103)
第五章	有源相控阵雷达技术	(106)
§ 5.1	有源相控阵雷达	(106)
5.1.1	有源相控阵雷达概述	(106)
5.1.2	有源相控阵雷达的组成特点	(108)
5.1.3	有源相控阵雷达试验系统	(111)
§ 5.2	有源相控阵雷达关键部件——T/R 组件	(118)
5.2.1	有源相控阵与 T/R 组件	(118)
5.2.2	T/R 组件的基本组成和工作原理	(119)
5.2.3	T/R 组件研制类型与实例	(120)
5.2.4	T/R 组件的工程设计	(124)
5.2.5	T/R 组件相关设计技术的实践与结论	(125)
§ 5.3	T/R 组件制造工艺	(127)
5.3.1	T/R 组件制造工艺简述	(127)
5.3.2	基板制造技术	(128)
5.3.3	电路组装	(131)
5.3.4	测试及调试	(135)
5.3.5	T/R 组件制造新技术	(139)
§ 5.4	空间探测相控阵雷达接收机	(140)
5.4.1	空间探测相控阵雷达接收机的特点和组成	(140)
5.4.2	接收机的主要性能指标分析和参数优化	(143)
第六章	空间探测相控阵雷达天线馈线技术	(159)
§ 6.1	天线技术	(159)
6.1.1	引言	(159)
6.1.2	相控阵天线辐射单元设计	(160)
6.1.3	密度加权相控阵天线设计	(163)
6.1.4	密度加权相控阵关键技术	(169)
§ 6.2	馈线技术	(176)
6.2.1	概述	(176)
6.2.2	移相器技术	(176)
6.2.3	驻波副瓣与馈线系统匹配技术	(184)
§ 6.3	幅相测量与校正技术	(190)
§ 6.4	有源相控阵天馈系统中的一体化设计	(193)
第七章	自适应数字波束形成	(199)
§ 7.1	引言	(199)

7.1.1	接收阵天线增益与副瓣电平调整	(199)
7.1.2	发射波束内信号能量的充分利用	(199)
§ 7.2	自适应数字波束形成	(200)
7.2.1	自适应数字波束形成基本原理	(200)
7.2.2	自适应方法及自适应准则	(202)
7.2.3	部分自适应阵方法	(205)
§ 7.3	系统误差对自适应数字波束形成性能的影响	(207)
7.3.1	通道之间的幅相不一致性对 DBF 副瓣性能的影响	(207)
7.3.2	系统误差的校正	(208)
7.3.3	幅相不一致性对自适应阵列输出信干噪比(SINR)的影响	(210)
7.3.4	通道频响不一致性对系统性能的影响	(213)
7.3.5	通道冲激响应误差与频率响应误差之间的关系	(214)
7.3.6	通道失配对自适应阵列输出信干噪比(SINR)的影响	(215)
7.3.7	全数字控制的发射波束形成	(217)
7.3.8	交叉极化对自适应阵列性能的影响	(217)
§ 7.4	空间谱估计	(220)
7.4.1	信号模型	(221)
7.4.2	Capon 法	(222)
7.4.3	MUSIC 法	(222)
7.4.4	线性预测	(223)
§ 7.5	线阵实验床	(225)
第八章	宽带相控阵雷达技术	(228)
§ 8.1	宽带雷达	(228)
8.1.1	概述	(228)
8.1.2	宽带系统失真和均衡	(228)
8.1.3	宽带信号产生与处理	(229)
8.1.4	宽带信号的多普勒耦合与修正	(232)
8.1.5	宽带信号的电离层传播及修正	(233)
§ 8.2	宽带相控阵雷达	(234)
8.2.1	相控阵对瞬时带宽的限制	(234)
8.2.2	实时延迟线补偿	(239)
§ 8.3	宽带相控阵雷达系统	(241)
8.3.1	概述	(241)
8.3.2	宽带相控阵雷达系统组成	(242)
8.3.3	宽带相控阵雷达系统工作原理	(243)
8.3.4	宽带相控阵雷达的目标一维、二维成像	(243)
第九章	空间探测相控阵雷达的发展趋势	(248)
§ 9.1	对空间探测相控阵雷达的一些新要求	(248)
§ 9.2	向微波波段高端及毫米波波段的发展趋势	(249)

9.2.1	目标 RCS 与雷达工作波长的关系	(249)
9.2.2	微波波段高端空间目标探测相控阵雷达的应用	(251)
9.2.3	大型毫米波相控阵雷达	(252)
§ 9.3	高功率有源相控阵雷达的一些关键技术	(253)
9.3.1	有源相控阵雷达的一些关键技术	(253)
9.3.2	有源相控阵雷达馈线系统的设计	(256)
9.3.3	采用光电子技术的有源相控阵天线技术	(256)
§ 9.4	多频段与宽带相控阵雷达技术	(257)
9.4.1	双频/多频相控阵天线	(257)
9.4.2	宽带相控阵雷达技术	(257)
§ 9.5	高性能相控阵天线技术	(258)
9.5.1	多波束相控阵天线	(258)
9.5.2	共形相控阵天线	(261)
9.5.3	低/超低副瓣有源相控阵天线	(262)
参考文献		(265)