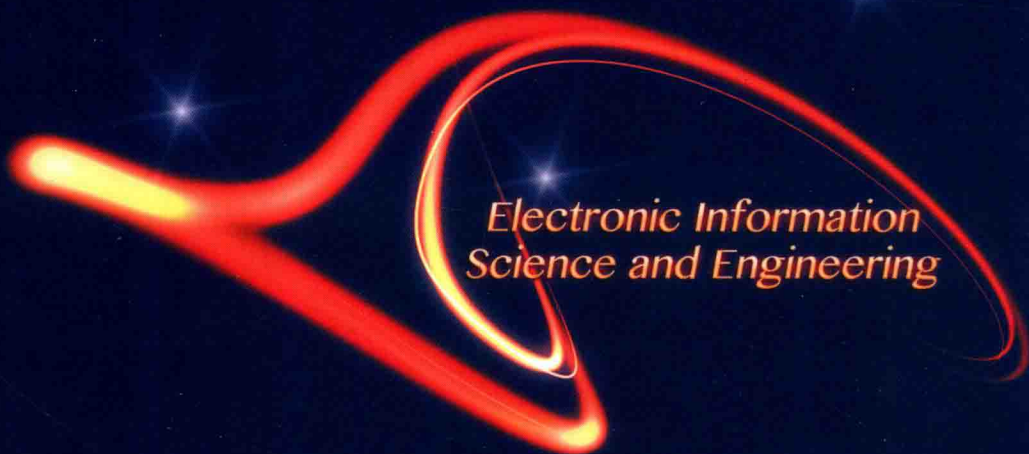




北京市高等教育精品教材立项项目



Electronic Information
Science and Engineering

电子信息科学与工程类专业精品教材

雷达系统及其 信息处理 (第2版)

◎ 许小剑 黄培康 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



北京市高等教育精品教材立项项目
电子信息科学与工程类专业精品教材

雷达系统及其信息处理

(第2版)

许小剑 黄培康 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书定位为高等院校信息类专业高年级本科生和研究生教材,其特色是:不是单纯地讲授雷达原理或雷达基本理论,而是根据现代雷达系统的特点,站在雷达系统及其同目标与环境的相互作用、信号获取与信息处理的角度,阐述雷达系统及其信息处理中的相关问题。

在内容编排上,本书强调雷达信号基本理论、雷达系统同目标与环境的相互作用,以及先进雷达系统中的信息获取与信息处理技术。为此,本书按照4个模块编写。第1章和第2章介绍雷达基本概念、发展历史和趋势及预备知识;第3、4、5章阐述雷达系统基本原理和基本理论,包括雷达发射与接收、雷达方程与目标检测、雷达波形与处理;第6章和第7章着重分析雷达系统同目标与环境的相互作用,包括雷达目标、大气传播和背景散射等;第8、9、10章讨论先进雷达系统及其处理技术,包括雷达测量与跟踪、脉冲多普勒和动目标指示雷达及高分辨率雷达成像。本次修订重点增加了波形分集等前沿技术、雷达目标高分辨率图像理解、环境杂波模型等方面的论述。

本书既可作为高等院校相关专业本科高年级学生和研究生相关课程的教材,又可作为从事雷达系统、微波遥感、电磁散射、信号与信息处理等相关专业的工程技术人员及雷达部队官兵的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统及其信息处理 / 许小剑,黄培康编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2018.11
ISBN 978-7-121-34762-7

I. ①雷… II. ①许… ②黄… III. ①雷达系统—信息处理—高等学校—教材 IV. ①TN955
中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第161135号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:王晓庆 特约编辑:陈晓莉

印 刷:三河市君旺印务有限公司

装 订:三河市君旺印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:20.5 字数:525千字

版 次:2010年2月第1版

2018年11月第2版

印 次:2018年11月第1次印刷

定 价:58.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,(010)88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010)88254113,wangxq@phei.com.cn。

再版前言

《雷达系统及其信息处理》第一版于2009年成稿、2010年出版。正如作者在第一版前言中所指出的,编写本书目的不是提供一本完整的关于雷达原理的教程,而是站在雷达系统同目标与环境的相互作用、信息获取与信息处理的角度,讨论现代雷达系统及其信息处理中的基础理论、基本原理及前沿技术问题。《雷达系统及其信息处理》从第一版出版至今已近十年,十年间电子技术的迅猛发展及其他新兴技术的涌现,使得雷达在内涵、技术,甚至形态上发生着日新月异的变化,例如,宽带高分辨率雷达成像技术已完全进入成熟应用期,波形分集、太赫兹波、多输入多输出(MIMO)雷达、认知雷达、微波光子及量子雷达等新技术、新体制取得突破或得以涌现。很明显,原版教材已经很难满足新的雷达课程教学的需要。

本次修订依然沿用了第一版教材中将教学内容划分为4个模块共10章的全书结构安排,但针对新的教学需求,对各模块、各章节具体做了大量的充实和修订。本次修订的重点包括:一是增加对雷达前沿技术(如波形分集技术和各种新体制雷达)的论述,主要体现在对第1章、第5章的修改;二是呼应高分辨率雷达成像技术得到广泛应用的现状和需求,增加扩展目标雷达散射特性表征、雷达图像理解等前沿技术内容,主要体现在对第6章、第7章、第10章的修改充实;三是针对现代雷达信号处理对背景杂波模型提出了越来越多需求这一技术趋势,以较大的篇幅增加了地、海杂波半经验模型和统计模型的内容,主要体现在对第7章的修改和内容充实。此外,在每一章的最后增加了思考题,便于读者通过对思考题的解答检验学习效果。

对各模块、章节的具体修订内容如下。

模块1——雷达基础和预备知识:本模块由第1章、第2章构成。根据雷达技术的最新进展,在第1章增加了太赫兹波、汽车雷达等新内容,同时增加了“雷达的未来”作为1.4.3节,简要概述MIMO雷达、认知雷达、微波光子雷达和量子雷达等近年来得到迅速发展的前沿雷达技术。第2章在原版内容基础上,进一步强化了同雷达密切相关的近场与远场、电磁波极化等概念;同时,为了更好地呼应第6章中关于目标电磁散射的讨论,重写了2.6.4节,增加了扩展目标对于平面波的绕射现象等问题的介绍,为第6章、第7章关于目标与环境电磁散射问题的讨论提供必要的预备知识。

模块2——雷达系统基本理论:本模块由第3章、第4章、第5章组成。第3章对3.7.6节关于雷达接收机I/Q通道失真及其校正进行了重写,同时增加3.7.7节,讨论系统非线性的影响,后者对于宽带高分辨率成像雷达至关重要;增加了3.8节,专门讨论系统噪声和灵敏度问题,并且把第一版中3.6.3节内容并入本节。第4章增加了搜索雷达方程相关内容。第5章对本章的标题、5.3节内容进行了调整,并对5.6节进行了完全重写。其中,5.3节讨论雷达波形与分辨率,增加了5.3.4节,讨论波形评价准则;删除了第一版中5.6节关于雷达自适应信号处理概念的内容,增加了波形分集概念及其应用的相关内容,包括波形分集概念、抗干扰和杂波抑制波形优化、目标识别波形优化和认知雷达等技术内容,以便更好地反映现代雷达系统对于信号与波形设计、优化和智能化处理等新技术、新方法的需求。

模块3——雷达系统同目标与环境的相互作用:由第6章、第7章构成。第6章中对6.2节和6.4节进行了重写,并增加了6.9节。其中,6.2节介绍雷达散射截面(RCS)的概念,讨

论其物理意义,并针对现代雷达成像技术的成熟和广泛应用,引入扩展目标的散射函数和散射分布函数概念,为后续关于成像原理的讨论提供必要基础;6.4节讨论极化散射矩阵问题,主要对极化散射矩阵的概念和变换的数学模型与表达式等做了重新整理,使初学者更易理解;6.9节讨论目标 RCS 图像理解问题,通过对各种典型目标散射机理在一维和二维雷达图像中的表现形式的深入分析,阐述了复杂目标 RCS 图像的理解问题。第7章在第一版内容的基础上进行了大幅的内容扩充,主要包括:在7.6.7节增加地面后向散射系数的乌拉比(Ulaby)模型;7.7.4节增加了多个海面后向散射系数半经验模型;新增7.9节,讨论地、海杂波统计模型,包括瑞利分布模型、韦布尔分布模型、对数-正态分布模型和复合K分布模型,同时讨论了统计模型的应用问题。

模块4——先进雷达系统及其信息处理技术:由第8章、第9章、第10章构成。第8章对8.2.3节原有内容进行了扩充,增加了同时测量速度大小与运动方向的相关内容,并对其他各节做了较多的修改。第9章重写了9.1节,以便更好地体现脉冲多普勒(PD)雷达是以动目标指示(MTI)雷达技术为基础发展而来的,体现今天的技术发展使得PD和MTI的区分边界已经模糊的现实;对9.2节和9.5节内容进行了重新调整,将第一版9.2.4节关于多普勒滤波器组的内容并入9.5节,作为9.5.3节,便于读者更好地理解MTI技术的发展沿革。第10章重写了10.3.1节,采用“散射分布函数”替换第一版中关于三维扩展目标散射表征时采用的“目标复反射率”这一不严谨术语;增加了10.7节,简要讨论合成孔径雷达(SAR)图像理解问题。

本书由许小剑、黄培康编著。本书的修订得到了北京航空航天大学领导及诸多同仁的大力支持和帮助,恕不一一罗列,谨在此一并致以诚挚的谢意!

在本书修订过程中,作者尽可能严谨地完成每一章节的勘误、内容调整和充实,但由于作者学识和水平所限,百密必有一疏,还望读者海涵并不吝指教。

作者
2018年10月

前 言

《雷达系统及其信息处理》定位为高等院校信息类专业高年级本科生和研究生教材。书中既借鉴了本领域国内外众多著作的思想,又融入了作者多年来的一些研究成果,故兼具专著的一些特征。

自 2003 年以来,本书的作者之一一直承担北京航空航天大学、航天科工集团二院研究生院的现代雷达系统理论、雷达成像原理、先进感知系统及其信息处理及高年级本科生雷达原理等课程的教学。本书的另一作者长期从事雷达目标与环境特性研究,并主持航天科工集团二院研究生院的研究生培养工作。在多年的研究生和本科生培养教学实践中,作者深感在国防院校和院所信息与通信系统、电子科学与技术等信息类专业的教学中,很难选择一本合适的关于雷达及其信息处理的教材,而在这些院校中,雷达又往往是相关专业研究生、本科生的必修课。本书的撰写和出版正是为了满足这样一种需求而完成的。基于此,本书的撰写特色是:不是单纯地讲授雷达原理或雷达基本理论,而是根据现代军用雷达系统的特点,强调雷达信号基本理论、雷达系统同目标与环境的相互作用,以及先进雷达系统中的信息处理技术等。

《雷达系统及其信息处理》共分 10 章,作者站在雷达系统及其同目标与环境的相互作用、信号获取与信息处理的角度,阐述雷达系统及其信息处理问题,内容涵盖基础和预备知识、雷达系统基本理论、雷达系统同目标与环境的相互作用及先进雷达系统及其处理技术等 4 大模块。

模块 1——雷达基础和预备知识:第 1 章、第 2 章,主要介绍雷达的基本知识、发展历史、发展趋势和应用,以及同雷达密切相关的电磁波基础知识。

模块 2——雷达系统基本理论:第 3 章、第 4 章、第 5 章,主要阐述雷达测距和测速的基本原理、雷达发射机与接收机的系统组成、相参雷达基本原理、雷达方程、噪声中的目标检测、雷达波形、匹配滤波、雷达模糊度函数、脉冲压缩和自适应处理等概念、原理和理论。

模块 3——雷达系统同目标与环境的相互作用:第 6 章、第 7 章,主要讨论雷达目标与环境电磁散射对雷达的影响,包括雷达散射截面(RCS)的概念和定义,目标散射的频率特性、极化特性,目标散射中心的概念,散射机理和物理与数学解释,RCS 统计模型,大气衰减和折射,地球曲率对雷达波的影响,地、海背景的杂波特性和模型等。

模块 4——先进雷达系统及其信息处理技术:第 8 章、第 9 章、第 10 章,首先总结雷达测距、测速、测角的误差理论,分析从信息处理角度看三者之间的一致性,介绍雷达跟踪的基本原理;然后重点讨论脉冲多普勒(PD)雷达、动目标指示(MTI)雷达及其信息处理,包括运动平台对雷达探测的影响、MTI 和 PD 雷达的基本原理、不同工作方式与信号处理;最后讨论高分辨率雷达成像问题,通过对采用步进频率波形(SFW)和线性调频波形的雷达回波的深入分析,导出雷达的径向距离分辨率和合成雷达距离像,通过对转台目标的多普勒同横向距离的关系导出雷达的横向距离分辨率,进而介绍旋转目标的距离—多普勒成像原理,最后引出逆合成孔径雷达(ISAR)、合成孔径雷达(SAR)和干涉 SAR(InSAR)成像的概念与原理。

由此可见,本书在内容编排和取舍上具有以下特点:一是由浅入深,保证易学性;二是强调内容的新颖性、先进性;三是注重知识的系统性。如果作为教材使用,授课教师可根据上述

4 个知识模块,依照学时数和授课对象的不同对内容进行取舍。

作者在本书撰写过程中深受本领域一些已经出版的著作、教材和相关文献的启发与影响,在各章的最后尽量准确地给出了主要参考文献,在此谨向有关作者和出版社一并致谢。但凡有疏漏或不妥之处,还望相关文献作者和本书读者海涵。

在本书撰写过程中,得到冯祥芝博士、王彩云博士、李晓飞博士生等人的大量帮助,北京航空航天大学 2004—2009 年期间选修“现代雷达系统理论”课程的历届研究生、选修“雷达原理”课程的历届本科生、航天科工集团二院研究生院 2003—2006 年期间选修“雷达成像原理”课程的历届研究生对原讲义、讲稿的修改完善提出了许多宝贵意见,电子工业出版社的陈晓莉为本书的编辑与出版付出了辛勤的努力,在此一并表示衷心的感谢。

编 著 者

2009 年 11 月于北京

目 录

第 1 章 引论	1
1.1 雷达的概念	1
1.2 电磁波谱及雷达频段	1
1.2.1 电磁波谱	1
1.2.2 雷达频段的特性	2
1.3 雷达系统的分类	3
1.4 雷达的起源、发展和未来	4
1.4.1 雷达的起源	4
1.4.2 雷达的发展	8
1.4.3 雷达的未来	11
1.5 雷达的应用	15
1.5.1 民用雷达的应用	15
1.5.2 军用雷达的应用	17
1.6 雷达系统及其同目标与环境的相互作用	22
1.6.1 最基本的雷达系统	22
1.6.2 雷达系统同目标与环境的相互作用模型	23
第 1 章思考题	24
参考文献	25
第 2 章 电磁场与电磁波基础	27
2.1 麦克斯韦方程	27
2.1.1 麦克斯韦方程及其物理意义	27
2.1.2 电磁场的基本性质	29
2.1.3 电磁场的边界条件	29
2.1.4 坡印亭定理	30
2.2 时谐场	32
2.2.1 相量形式的麦克斯韦方程	32
2.2.2 相量形式的边界条件	33
2.2.3 相量形式的坡印亭定理	33
2.3 球面波和平面波	34
2.3.1 球面波与平面波的概念	34
2.3.2 近场与远场	34
2.4 电磁波的极化	35
2.4.1 极化波的概念	35
2.4.2 线极化	37
2.4.3 圆极化	37
2.4.4 椭圆极化	38
2.4.5 场的极化分解	39

2.5	平面波的传播	39
2.6	平面波的反射、折射、绕射和散射	41
2.6.1	惠更斯原理	41
2.6.2	平面波的反射	42
2.6.3	平面波的折射	43
2.6.4	平面波的绕射	44
2.6.5	平面波的散射	45
第2章思考题		46
参考文献		46
第3章 雷达发射与接收		47
3.1	雷达信号及其表示方式	47
3.2	脉冲雷达与目标距离测量	49
3.2.1	脉冲雷达	49
3.2.2	目标距离的测量	50
3.3	相参雷达与目标多普勒频率测量	50
3.3.1	相参雷达的概念	50
3.3.2	目标多普勒频率的测量	51
3.4	雷达天线	53
3.4.1	天线的主要参数	53
3.4.2	孔径天线	55
3.4.3	相控阵列天线	56
3.5	雷达发射机	59
3.5.1	雷达发射机的分类及特点	59
3.5.2	雷达发射机的主要技术指标	61
3.5.3	射频功率源	62
3.5.4	脉冲调制器	63
3.6	雷达接收机	64
3.6.1	雷达接收机的组成	64
3.6.2	超外差式接收机的主要技术指标	65
3.7	相参雷达系统	66
3.7.1	振荡频率源	66
3.7.2	波形调制	67
3.7.3	混频器	68
3.7.4	限幅器	68
3.7.5	信号解调与正交检波	69
3.7.6	I/Q通道失真及其校正	70
3.7.7	系统非线性的影响	72
3.7.8	相参雷达各点信号波形小结	75
3.8	系统噪声和灵敏度	76
3.8.1	接收机噪声	76
3.8.2	噪声系数	77
3.8.3	噪声系数的计算	78
3.8.4	接收机灵敏度的计算	79

第3章思考题	80
参考文献	81
第4章 雷达方程与目标检测	83
4.1 基本雷达方程	83
4.1.1 雷达方程的推导	83
4.1.2 雷达方程的讨论	85
4.2 噪声中的信号检测	87
4.2.1 信号检测基本原理	88
4.2.2 门限检测	89
4.2.3 雷达脉冲的积累	90
4.3 虚警概率和检测概率	91
4.3.1 虚警概率	91
4.3.2 检测概率	92
4.3.3 提高检测概率的方法	93
4.4 恒虚警率检测	94
4.5 对雷达方程的进一步讨论	95
4.5.1 用检测因子和能量表示的雷达方程	95
4.5.2 双站雷达方程	97
4.5.3 搜索雷达方程	97
4.5.4 雷达方程的使用	98
第4章思考题	99
参考文献	100
第5章 雷达波形与处理	101
5.1 匹配滤波器	101
5.1.1 匹配滤波器的响应	101
5.1.2 匹配滤波器对时延和多普勒频移信号的响应	103
5.2 雷达模糊度函数	104
5.2.1 雷达模糊度函数的定义	104
5.2.2 雷达模糊度函数的性质	105
5.2.3 模糊度函数的时延和多普勒切片	106
5.3 雷达波形与分辨率	106
5.3.1 径向距离分辨率	106
5.3.2 信号带宽与距离分辨率	108
5.3.3 多普勒频率分辨率	109
5.3.4 波形评价准则	110
5.4 典型雷达波形及其模糊度函数	111
5.4.1 单频脉冲	111
5.4.2 线性调频脉冲	113
5.4.3 相干脉冲串	117
5.4.4 相位编码信号	121
5.4.5 模糊函数轮廓图	124
5.5 数字脉冲压缩	126

5.5.1	脉冲压缩的概念	126
5.5.2	线性调频脉冲的数字脉冲压缩	126
5.5.3	线性调频脉冲的加权处理	128
5.5.4	相位编码信号的数字脉冲压缩	129
5.5.5	二相巴克码信号的加权处理	130
5.6	波形分集概念及应用	132
5.6.1	波形分集概念	132
5.6.2	抗干扰波形优化:信干噪比最大化	133
5.6.3	杂波抑制波形优化:信杂比最大化	134
5.6.4	目标识别波形优化:最大辨识度	136
5.6.5	认知雷达:知识辅助的全自适应方法	136
第5章思考题		137
参考文献		138
第6章 雷达目标		140
6.1	概述	140
6.2	目标 RCS 的基本概念	141
6.2.1	RCS 的定义及其物理意义	141
6.2.2	目标 RCS 与雷达探测	144
6.2.3	目标散射函数的概念	144
6.3	雷达目标的三个散射区	148
6.3.1	瑞利区	148
6.3.2	谐振区	149
6.3.3	光学区	149
6.4	目标散射的极化特性	150
6.4.1	极化散射矩阵	150
6.4.2	极化散射矩阵变换	152
6.5	散射中心	153
6.5.1	散射中心的概念	153
6.5.2	散射中心的带通滤波解释	155
6.6	复杂目标的高频散射机理	157
6.7	几种简单目标的 RCS	159
6.7.1	完纯导体球	159
6.7.2	矩形金属平板	160
6.7.3	球头锥	162
6.8	目标 RCS 起伏的统计模型	164
6.8.1	RCS 起伏的物理解释	164
6.8.2	χ 平方分布和 Swerling 模型	165
6.8.3	Rice 分布模型	167
6.8.4	对数-正态分布模型	167
6.9	目标 RCS 图像理解	168
6.9.1	金属球的一维和二维散射图像	168
6.9.2	不同散射机理在雷达图像中的表现形式	173

第 6 章思考题	181
参考文献	182
第 7 章 雷达系统与外部环境的相互作用	184
7.1 大气传播衰减	184
7.1.1 地球大气层	184
7.1.2 传播衰减	185
7.2 大气折射的影响	188
7.3 地球曲率的影响	189
7.3.1 雷达直视距离	189
7.3.2 擦地角的计算	191
7.3.3 地球曲率产生的发散	191
7.4 粗糙表面的反射和散射	192
7.4.1 粗糙表面的反射	192
7.4.2 郎伯反射体	193
7.5 多路径效应	193
7.6 地杂波	195
7.6.1 散射系数	195
7.6.2 照射面积 A 的计算	196
7.6.3 地面后向散射系数与表面粗糙度的关系	197
7.6.4 地面后向散射系数随擦地角的变化	198
7.6.5 地面后向散射系数随频率的变化	198
7.6.6 地面后向散射系数的极化特性	199
7.6.7 地面后向散射系数半经验模型	199
7.7 海杂波	206
7.7.1 海面后向散射系数随擦地角及条件的变化	206
7.7.2 海面后向散射系数的极化特性	207
7.7.3 海面后向散射系数与风速及风向的关系	207
7.7.4 海面后向散射系数半经验模型	207
7.8 体散射杂波	213
7.9 地、海杂波统计模型	214
7.9.1 瑞利分布模型	214
7.9.2 韦布尔分布模型	215
7.9.3 对数—正态分布模型	216
7.9.4 复合 K 分布模型	217
7.9.5 统计模型的应用	218
7.10 杂波的内部调制谱	219
7.10.1 高光谱模型	219
7.10.2 幂次律模型	220
7.10.3 指数律模型	220
7.11 外部噪声	221
7.11.1 大气噪声	221
7.11.2 宇宙噪声	222

第7章思考题	222
参考文献	223
第8章 雷达尺度参数测量和目标跟踪	225
8.1 雷达测距	225
8.1.1 目标距离测量	225
8.1.2 最大不模糊距离	226
8.1.3 测距精度	227
8.2 雷达测速	229
8.2.1 多普勒频率及速度的测量	229
8.2.2 机载雷达目标的多普勒频率分析	230
8.2.3 最大不模糊多普勒频率(速度)	233
8.2.4 雷达测频(测速)精度	234
8.3 雷达“测不准”原理介绍	235
8.3.1 雷达时间信号同其频谱之间的关系	235
8.3.2 雷达“测不准”原理	237
8.4 雷达测角	238
8.4.1 波束切换和圆锥扫描	238
8.4.2 单脉冲雷达	239
8.4.3 雷达测角精度	240
8.4.4 雷达测距、测速和测角的共同点	240
8.5 雷达跟踪	241
8.5.1 雷达跟踪的分类	241
8.5.2 距离跟踪	242
8.5.3 角度跟踪	242
8.5.4 目标噪声对测量和跟踪的影响	244
第8章思考题	245
参考文献	246
第9章 脉冲多普勒雷达与处理	247
9.1 基本概念	247
9.2 运动平台和目标的多普勒特性	248
9.2.1 PD雷达的多普勒频移	248
9.2.2 PD雷达的回波	249
9.2.3 杂波对消	252
9.3 测距和测速模糊的解算	253
9.3.1 测距模糊的解算	253
9.3.2 “幻影”问题	254
9.3.3 测速模糊的解算	255
9.3.4 遮挡的消除	256
9.4 延时线对消器	257
9.4.1 延时线对消器的响应	258
9.4.2 杂波衰减因子	259
9.4.3 MTI改善因子	260

9.4.4	杂波中的可见度(SCV)	260
9.4.5	多级延时线对消器及其实现结构	260
9.5	MTI 雷达	261
9.5.1	MTI 雷达工作原理	261
9.5.2	“盲相”问题	262
9.5.3	多普勒滤波器组	263
9.5.4	数字 MTI 处理器	265
9.5.5	运动平台的 MTI 雷达	265
9.5.6	杂波多普勒中心频率的补偿	266
9.5.7	杂波多普勒展宽的补偿	266
9.6	PD 雷达低重频方式	268
9.6.1	低重频 PD 雷达的回波	269
9.6.2	低重频 PD 雷达的目标检测	269
9.6.3	最佳滤波器	270
9.6.4	PD 雷达低重频方式的信号处理	271
9.7	PD 雷达中重频方式	272
9.7.1	中重频 PD 雷达的回波	272
9.7.2	中重频 PD 雷达的目标检测	272
9.7.3	中重频 PD 雷达的信号处理	273
9.7.4	PD 雷达中重频方式的一些说明	273
9.8	PD 雷达高重频方式	274
9.8.1	高重频 PD 雷达的回波	275
9.8.2	高重频 PD 雷达的目标检测	275
9.8.3	高重频 PD 雷达的信号处理	276
9.8.4	PD 雷达高重频方式的一些说明	277
9.8.5	PD 雷达不同重频工作方式的比较	277
第 9 章思考题		278
参考文献		279
第 10 章 高分辨率雷达成像与处理		280
10.1	雷达的径向距离高分辨率	280
10.1.1	步进频率波形与合成高分辨率距离像	281
10.1.2	LFM 波形和展宽处理	283
10.2	雷达的横向距离分辨率	287
10.2.1	旋转目标的多普勒	288
10.2.2	横向距离分辨率	288
10.3	转台目标的距离—多普勒成像	290
10.3.1	三维扩展目标的散射分布函数	290
10.3.2	旋转目标的距离—多普勒二维成像	291
10.3.3	二维 FFT 算法	293
10.3.4	滤波—逆投影算法	293
10.4	逆合成孔径雷达成像及其运动补偿	294
10.5	合成孔径雷达成像	296
10.5.1	实孔径雷达(RAR)和合成孔径雷达(SAR)的比较	297

10.5.2	SAR 成像模式	298
10.5.3	SAR 成像雷达的参数选择问题	300
10.6	干涉合成孔径雷达成像	302
10.6.1	InSAR 高程测量的基本原理	303
10.6.2	InSAR 高程测量的过程	304
10.7	SAR 图像理解	308
第 10 章思考题		310
参考文献		311

第1章 引 论

1.1 雷达的概念

雷达一词是英文 Radio Detection And Ranging 缩写词“RADAR”的音译,其原意为“无线电探测与测距”。雷达利用目标对电磁波的散射现象来发现目标并测定其位置。

现代雷达是一种综合了电子科学各种技术成就的高科技信息感知与处理系统,它涉及电子信息工程中几乎所有的技术要素,如信号(signal)和波形(waveform)设计、发射机(transmitter)、接收机(receiver)、天线(antenna)、电磁波(electromagnetic wave)传播(propagation)、电磁散射(scattering)和辐射(radiation)、信号处理(signal processing)、信息提取(information extraction)、检测(detection)、参数估计(parameter estimation)、目标分类与识别(target identification and recognition)等。

早期的雷达将所探测的目标对象视为一个“点”,雷达的功能是测定该“点目标”的三维位置坐标、速度与加速度等参数,这类雷达现在一般称为尺度测量(metric measurement)雷达。随着技术的进步,现代雷达不仅能测定目标的尺度参数,而且通过对雷达回波的幅度(amplitude)与相位(phase)的精确测量、分析和处理,还能得到被观测目标的其他各种特征参量,如目标的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)、角闪烁(glint)特征、极化散射矩阵(Polarimetric Scattering Matrix, PSM)、目标散射中心(scattering center)分布图、目标自然谐振频率(natural resonance frequency)等。能够观测目标这些特征参量的雷达称为特征测量(signature measurement)雷达,所测得的参量反映了被观测目标本身所固有的雷达散射特征,通常称为雷达目标特征信号(signature)。

通过现代先进雷达探测系统,雷达不但能告诉我们目标在哪里、运动速度有多快,而且还能告诉我们所观测的目标具有什么特征。形象地说,现代雷达不仅可以是一部望远镜,而且也可以是一台显微镜。因此,现代雷达较为确切的定义应是:雷达是对远距离目标进行无线电探测、分辨、定位、测轨和识别的一种传感器系统^[1]。

1.2 电磁波谱及雷达频段

1865年,麦克斯韦(J. C. Maxwell)提出了奠定电磁场理论基础的麦克斯韦方程,揭示了随时间变化的电场与磁场相互转换的关系。麦克斯韦预言了电磁波的存在,并说明电磁波与光在自由空间中具有相同的传播速度,因此,麦克斯韦预示了光也是一种电磁波。

1886年,赫兹通过实验证明了电能够以电磁波的形式发射,并且其传播速度等于光速。1889年,赫兹还通过实验演示了电磁波碰到物体时会产生散射。这些实验直接为后来无线通信、雷达、电视等的发明奠定了基础。

1.2.1 电磁波谱

电磁波具有连续的频谱,其频率从低到高涵盖了声波、超声波、无线电频率、红外线、可见

光、紫外线、X 射线和 γ 射线等,整个电磁频谱的示意图如图 1-1 所示。

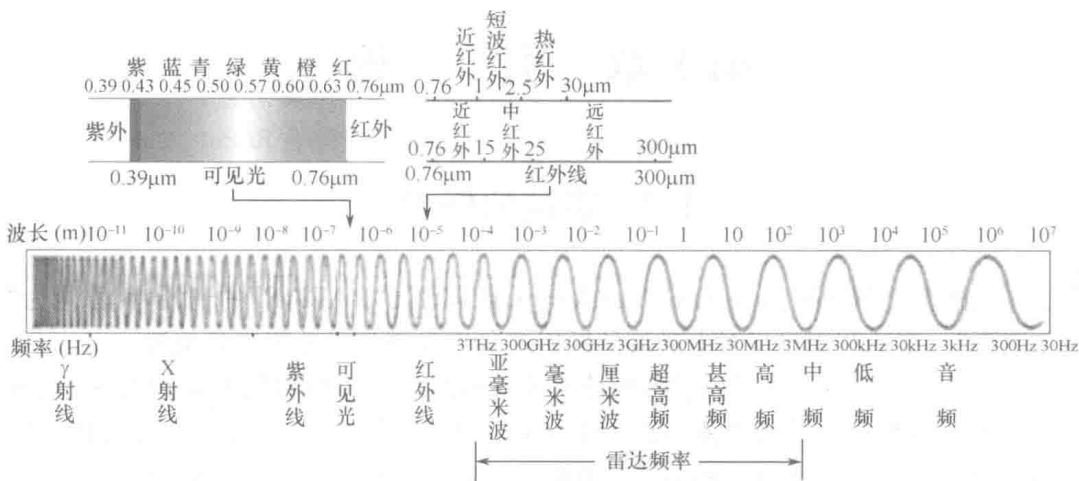


图 1-1 电磁频谱

在雷达工程领域中,常用一些英文字母来表示特定频段的名称,如 L 波段、S 波段、X 波段、K 波段等。这是第二次世界大战中一些国家为了对雷达工作频率保密而采用的符号表示,以后逐渐被所有雷达工程师所接受并一直沿用至今,且形成了标准。表 1-1 列出了美国电气与电子工程师协会(IEEE)于 1984 年制定并于 2002 年修订的雷达频段字母命名标准(IEEE Standard 521-2002),表中规定了各雷达频段的字母代码及其对应的频率范围^[2,20]。

表 1-1 雷达频段字母命名标准

波段名称	频 率	国际电信联盟分配的雷达频段
HF	3~30MHz	138~144MHz, 216~225MHz
VHF	30~300MHz	420~450MHz, 850~942MHz
UHF	300~1000MHz	1215~1400MHz
L	1~2GHz	2.3~2.5GHz, 2.7~3.7GHz
S	2~4GHz	5.25~5.925GHz
C	4~8GHz	8.5~10.68GHz
X	8~12GHz	13.4~14.0GHz, 15.7~17.7GHz
Ku	12~18GHz	24.05~24.25GHz
K	18~27GHz	33.4~36GHz
Ka	27~40GHz	59~64GHz
V	40~75GHz	76~81GHz, 92~100GHz
W	75~110GHz	126~142GHz, 144~149GHz
mm	110~300GHz	231~235GHz, 238~248GHz

根据雷达的工作原理,无论发射电磁波频率高或低,只要通过接收目标对电磁波的散射信号,对目标进行探测和定位,都属于雷达系统的工作范畴。图 1-1 对雷达工作的频率范围进行了标注,大致在 3MHz~3THz 范围,其中,300GHz~3THz 频段也称为太赫兹波。不同频率度量单位的换算关系为:1kHz=10³ Hz, 1MHz=10³ kHz, 1GHz=10³ MHz, 1THz=10³ GHz。

1.2.2 雷达频段的特性

每种频率范围的电磁波都具有自己的特性,工作在不同频率范围的雷达在工程实现时往