



北京市高等教育精品教材立项项目

电子信息与电气学科规划教材 · 电子信息科学与工程类专业

雷达系统及其信息处理

许小剑 黄培康 编著

764



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



欢迎登录 **免费** 获取本书教学资源
<http://www.hxedu.com.cn>

电子信息与电气学科规划教材 · 电子信息科学与工程类专业

雷达系统及其信息处理

本书定位为高等院校信息类专业本科高年级学生和研究生教材,兼具专著的一些特征。本书的特色是: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两者的角度,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、发展历史和趋势以及预备知识;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、雷达波形与信号处理;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;最后,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以及高分辨率雷达成像。

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教材,也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以及雷达部队官兵的参考书。



责任编辑:陈晓莉
封面设计:张昱

本书贴有激光防伪标志,凡没有防伪标志者,属盗版图书。



ISBN 978-7-121-10277-6



9 787121 102776 >

定价: 35.00 元



北京市高等教育精品教材立项项目

电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

雷达系统及其信息处理

许小剑 黄培康 编著

電子工業出版社

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学生和研究生教材,兼具专著的一些特征。本书的特色是: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两者的角度,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、发展历史和趋势以及预备知识;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、雷达波形与信号处理;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;最后,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以及高分辨率雷达成像。

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教材,也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以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. —北京:电子工业出版社,2010.2
电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业
ISBN 978-7-121-10277-6

I. 雷… II. ①许…②黄… III. 雷达—信息处理—高等学校—教材 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 014554 号

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京市顺义兴华印刷厂

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:16.5 字数:422 千字

印 次:2010 年 2 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:35.00 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。

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。

服务热线:(010)88258888。

前 言

《雷达系统及其信息处理》定位为高等院校信息类专业研究生和高年级本科生教材。书中既借鉴了本领域国内外众多著作的思想,也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。

本书的作者之一自 2003 年以来,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》以及高年级本科生《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,作者深感国防院校和院所信息与通信系统、电子科学与技术等学科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基于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》全书共分为 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两者的角度,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以及先进雷达系统及其处理技术等 4 大部分。即:

模块 1——雷达基础和预备知识:第 1、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、4、5 章,主要阐述雷达测距和测速的基本原理、雷达发射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、7 两章,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、9、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、不同工作方式和信号处理;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)成像的概念和原理。

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

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 雷达的起源和发展	4
1.4.1 雷达的起源	4
1.4.2 雷达的发展	8
1.5 雷达的应用	11
1.5.1 民用雷达的应用	11
1.5.2 军用雷达的应用	13
1.6 雷达系统及其同目标与环境的相互作用	18
1.6.1 最基本的雷达系统	18
1.6.2 雷达系统同目标与环境的相互作用模型	19
参考文献	20
第 2 章 电磁场与电磁波基础	22
2.1 麦克斯韦方程	22
2.1.1 麦克斯韦方程及其物理意义	22
2.1.2 电磁场的基本性质	24
2.1.3 电磁场的边界条件	24
2.1.4 坡印亭定理	25
2.2 时谐场	27
2.2.1 相量形式的麦克斯韦方程	27
2.2.2 相量形式的边界条件	28
2.2.3 相量形式的坡印亭定理	28
2.3 球面波和平面波	29
2.4 电磁波的极化	30
2.4.1 线极化	30
2.4.2 圆极化	31
2.4.3 椭圆极化	31
2.4.4 场的极化分解	32
2.5 平面波的传播	33
2.6 平面波的反射、折射、绕射和散射	34
2.6.1 惠更斯原理	34
2.6.2 平面波的反射	35
2.6.3 平面波的折射	37

2.6.4 平面波的绕射	37
2.6.5 平面波的散射	38
参考文献	38
第3章 雷达发射和接收	40
3.1 雷达信号及其表示方式	40
3.2 脉冲雷达与目标距离测量	42
3.2.1 雷达脉冲	42
3.2.2 目标距离的测量	43
3.3 相参雷达与多普勒频率测量	43
3.3.1 相参雷达的概念	43
3.3.2 目标多普勒频率的测量	45
3.4 雷达天线	46
3.4.1 天线的主要参数	46
3.4.2 孔径天线	48
3.4.3 相控阵列天线	49
3.5 雷达发射机	52
3.5.1 雷达发射机的分类及特点	52
3.5.2 雷达发射机的主要技术指标	54
3.5.3 射频功率源	55
3.5.4 脉冲调制器	56
3.6 雷达接收机	56
3.6.1 雷达接收机的组成	56
3.6.2 超外差接收机的主要技术指标	57
3.6.2.3 接收机的噪声系数和灵敏度	58
3.7 相参雷达系统	61
3.7.1 振荡频率源	62
3.7.2 波形调制	63
3.7.3 混频器	63
3.7.4 限幅器	64
3.7.5 信号解调与正交检波	64
3.7.6 I/Q 通道失真及其校正技术	66
3.7.7 相参雷达各点信号波形小结	67
参考文献	68
第4章 雷达方程与目标检测	69
4.1 基本雷达方程	69
4.1.1 雷达方程的推导	69
4.1.2 雷达方程的讨论	71
4.2 噪声中的信号检测	73
4.2.1 信号检测基本原理	74
4.2.2 门限检测	75
4.2.3 雷达脉冲的积累	76
4.3 检测概率和虚警概率	77

4.3.1	虚警概率	77
4.3.2	检测概率	78
4.3.3	提高检测概率的方法	79
4.4	恒虚警检测	79
4.5	对雷达方程的进一步讨论	81
4.5.1	用检测因子和能量表示的雷达方程	81
4.5.2	双站雷达方程	82
4.5.3	雷达方程的使用	83
参考文献		84
第5章	雷达波形与信号处理	85
5.1	匹配滤波器	85
5.1.1	匹配滤波器的响应	85
5.1.2	匹配滤波器对延时和多普勒频移信号的响应	87
5.2	雷达模糊度函数	88
5.2.1	雷达模糊度函数的定义	88
5.2.2	雷达模糊度函数的性质	89
5.2.3	模糊度函数的时延和多普勒切片	90
5.3	雷达的分辨率	90
5.3.1	雷达波形与径向距离分辨率	91
5.3.2	信号带宽与距离分辨率	92
5.3.3	多普勒频率分辨率	93
5.4	典型雷达波形及其模糊度函数	94
5.4.1	单频脉冲	94
5.4.2	线性调频脉冲	96
5.4.3	相干脉冲串	100
5.4.4	相位编码信号	103
5.4.5	模糊函数轮廓图	107
5.5	数字脉冲压缩	109
5.5.1	脉冲压缩的概念	109
5.5.2	线性调频信号的数字脉冲压缩	110
5.5.3	线性调频信号的加权处理	111
5.5.4	相位编码信号的数字脉冲压缩	112
5.5.5	二相巴克码信号的加权处理	113
5.6	雷达自适应信号处理的概念	115
5.6.1	有噪声参考信道的自适应处理	116
5.6.2	无噪声参考信道的自适应处理	116
5.6.3	空时自适应信号处理	117
参考文献		118
第6章	雷达目标	120
6.1	概述	120
6.2	雷达散射截面的定义	121
6.3	雷达目标的三个散射区	123

6.3.1 瑞利区	124
6.3.2 谐振区	124
6.3.3 光学区	124
6.4 目标散射的极化特性	125
6.4.1 极化散射矩阵	125
6.4.2 线—圆极化散射矩阵变换	127
6.5 目标散射中心的概念	128
6.5.1 散射中心的概念	128
6.5.2 散射中心的带通滤波解释	130
6.6 复杂目标的高频散射机理	132
6.7 几种简单目标的 RCS	134
6.7.1 完纯导体球	134
6.7.2 矩形金属平板	135
6.7.3 球头锥	137
6.8 目标 RCS 起伏的统计模型	139
6.8.1 RCS 起伏的物理解释	139
6.8.2 χ 平方分布和 Swerling 模型	140
6.8.3 Rice 分布模型	142
6.8.4 对数正态分布模型	142
参考文献	143
第 7 章 雷达系统与外部环境的相互作用	145
7.1 大气传播衰减	145
7.1.1 地球大气层	145
7.1.2 传播衰减	146
7.2 大气折射的影响	149
7.3 地球曲率的影响	150
7.3.1 雷达直视距离	150
7.3.2 擦地角的计算	152
7.3.3 地球曲率产生的发散	152
7.4 粗糙表面的反射和散射	153
7.4.1 粗糙表面的反射	153
7.4.2 郎伯反射体	154
7.5 多路径效应	154
7.6 地杂波	156
7.6.1 散射系数	156
7.6.2 照射面积 A 的计算	157
7.6.3 地面后向散射系数与表面粗糙度的关系	158
7.6.4 地面后向散射系数随擦地角的变化	158
7.6.5 地面后向散射系数随频率的变化	159
7.6.6 地面后向散射系数的极化特性	159
7.6.7 半经验模型	160
7.7 海杂波	160

7.7.1	海面后向散射系数随擦地角及条件变化	160
7.7.2	海面后向散射系数的极化特性	161
7.7.3	海面后向散射系数与风速及风向的关系	161
7.7.4	海杂波散射系数半经验模型	162
7.8	体散射杂波	164
7.9	杂波的内部调制谱	165
7.9.1	高斯频谱模型	165
7.9.2	幂次律模型	165
7.9.3	指数律模型	166
7.10	外部噪声	167
7.10.1	大气噪声	167
7.10.2	宇宙噪声	168
	参考文献	168
第8章	雷达尺度测量和目标跟踪	170
8.1	雷达测距	170
8.1.1	目标距离测量	170
8.1.2	最大不模糊距离	171
8.1.3	测距精度	172
8.2	雷达测速	174
8.2.1	多普勒频率及速度的测量	174
8.2.2	机载雷达目标的多普勒频率分析	175
8.2.3	最大不模糊多普勒频率(速度)	177
8.2.4	雷达测频(测速)精度	178
8.3	雷达“测不准”原理	178
8.3.1	雷达时间信号同其频谱之间的关系	178
8.3.2	雷达“测不准”原理	180
8.4	雷达测角	181
8.4.1	波束切换和圆锥扫描	181
8.4.2	单脉冲雷达	182
8.4.3	雷达测角精度	183
8.4.4	雷达测距、测速和测角的共同点	184
8.5	雷达跟踪	184
8.5.1	雷达跟踪的分类	184
8.5.2	距离跟踪	185
8.5.3	角度跟踪	186
8.5.4	目标噪声对测量和跟踪的影响	187
	参考文献	188
第9章	脉冲多普勒雷达与处理	190
9.1	基本概念	190
9.2	运动平台和目标的多普勒特性	191
9.2.1	PD雷达的多普勒频移	191
9.2.2	PD雷达的回波	192

9.2.3	杂波对消	195
9.2.4	多普勒滤波器组	195
9.3	测距和测速模糊的解算	197
9.3.1	测距模糊的解算	198
9.3.2	“幻影”问题	199
9.3.3	测速模糊的解算	200
9.3.4	遮挡的消除	201
9.4	延时线对消器	202
9.4.1	延时线对消器的响应	203
9.4.2	杂波衰减因子	203
9.4.3	MTI 改善因子	205
9.4.4	杂波中的可见度(SCV)	205
9.4.5	多级延时线对消器及其实现结构	205
9.5	MTI 雷达	206
9.5.1	MTI 雷达工作原理	206
9.5.2	“盲相”问题	206
9.5.3	数字 MTI 处理器	207
9.5.4	运动平台的 MTI 雷达	208
9.5.5	杂波多普勒中心频率的补偿	209
9.5.6	杂波多普勒展宽的补偿	209
9.6	PD 雷达低重频方式	211
9.6.1	低重频 PD 雷达的回波	211
9.6.2	低重频 PD 雷达的目标检测	212
9.6.3	最佳滤波器	213
9.6.4	PD 雷达低重频方式的信号处理	214
9.7	PD 雷达中重频方式	215
9.7.1	中重频 PD 雷达的回波	215
9.7.2	中重频 PD 雷达的目标检测	215
9.7.3	中重频 PD 雷达的信号处理	216
9.7.4	PD 雷达中重频方式的一些说明	216
9.8	PD 雷达高重频方式	217
9.8.1	高重频 PD 雷达的回波	218
9.8.2	高重频 PD 雷达的目标检测	218
9.8.3	高重频 PD 雷达的信号处理	219
9.8.4	PD 雷达高重频方式的一些说明	220
9.8.5	PD 雷达不同重频工作方式的比较	220
	参考文献	221
第 10 章	高分辨率雷达成像与处理	222
10.1	雷达的径向距离高分辨率	222
10.1.1	步进频率波形与合成高分辨率距离像	223
10.1.2	LFM 波形和展宽处理	225
10.2	雷达的横向距离分辨率	229
10.2.1	旋转目标的多普勒	230

10.2.2 横向距离分辨率	230
10.3 转台目标的距离—多普勒成像	232
10.3.1 目标复反射率函数	232
10.3.2 旋转目标的距离—多普勒二维成像	233
10.3.3 二维 FFT 算法	235
10.3.4 滤波—逆投影算法	235
10.4 逆合成孔径雷达成像及其运动补偿	236
10.5 合成孔径雷达成像	239
10.5.1 实孔径雷达(RAR)和合成孔径雷达(SAR)的比较	239
10.5.2 SAR 成像模式	240
10.5.3 SAR 成像雷达的参数选择问题	242
10.6 干涉合成孔径雷达成像	244
10.6.1 InSAR 高程测量的基本原理	245
10.6.2 InSAR 高程测量的过程	246
参考文献	250

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,它涉及了电子信息工程中几乎所有的技术要素,例如: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看做为一个“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(RCS)、角闪烁(glint)特征、复极化(polarization)散射矩阵、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,雷达不仅可以是一部望远镜,而且可以是一台显微镜。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、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(Heinrich Hertz)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、可见光、紫外、X射线和 γ 射线等,整个电磁频谱的示意图如图1-1所示。

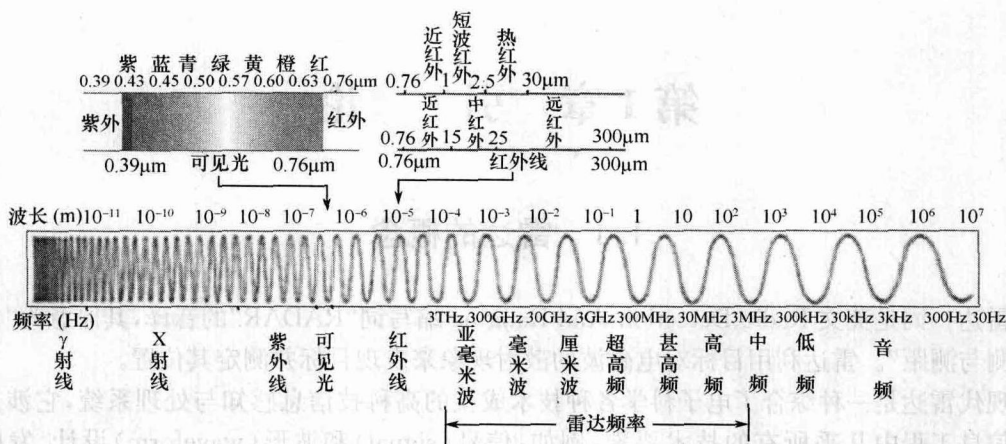


图 1-1 电磁频谱

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。这是在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,以后逐渐为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 年制定的雷达频段字母命名标准(IEEE Standard 521-1984),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]。

表 1-1 雷达波段命名及其对应的频率(IEEE 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的高低,只要是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,不同频率度量单位的换算关系为:1kHz=10³Hz, 1MHz=10³kHz, 1GHz=10³MHz, 1THz=10³GHz。

1.2.2 雷达频段的特性

每一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

往往差别很大。下面分几个大的频段进行介绍。

1. 米波段(包括 HF、VHF 和 UHF 频段)

早期的雷达多工作在这一频段。在该工作频段的雷达具有简单可靠、容易获得高辐射功率、容易制造、动目标显示性能好、不受大气传输的影响、造价低等优点。因此,在对空警戒雷达、电离层探测器、超视距雷达中有广泛的应用。该波段雷达的主要缺点是目标的角分辨率低。

2. 分米波段(包括 L 和 S 波段)

与米波频段雷达相比,分米波段雷达具有较好的角度分辨率、外部噪声干扰小、天线和设备尺寸适中等优点,因此在对空监视雷达中得到广泛使用。当要求一部雷达兼有对空探测和目标跟踪两种功能时,S 波段雷达最为合适。S 波段雷达是介于分米波和厘米波段之间的一种折中选择,可以成功地实现对目标的监视和跟踪,广泛地使用于舰载雷达。该波段雷达的辐射功率不如米波段的高,大气回波和大气衰减对其有一定的影响。

3. 厘米波段(包括 C、X、Ku 和 K 波段)

厘米波段雷达主要用于武器控制系统,它具有体积小、重量轻、跟踪精度高、可以得到足够大的信号带宽等优点,因此在机载火控雷达、机载气象雷达、机载多普勒导航雷达、地面炮瞄雷达、民用测速、防撞雷达中被广泛使用。该波段雷达的主要缺点是辐射功率不高、探测距离较近、大气回波和大气衰减影响较大、气象杂波等外部噪声干扰大等。但气象雷达主要是探测气象杂波,因此多工作在这个频段。

4. 毫米波段

毫米波段雷达具有天线尺寸小、目标定位精度高、分辨率高、信号频带宽、抗电磁波干扰性能好等优点。但毫米波段雷达具有辐射功率更小、机内噪声较高、气象杂波等外部噪声干扰大、大气衰减随频率的增高而迅速增加等缺点,又几乎掩盖了其优点。由于大气的衰减随频率的增高并不是单调地增加,而是存在着一些大气衰减较小的窗口,除非某些特定的应用(例如汽车防撞雷达),毫米波段雷达大多仅限于工作在这些窗口上。

5. 激光波段

激光波段雷达具有良好的距离和角度分辨率等优点,在测距和测绘系统中常被选用。其缺点是辐射功率小、波束太窄、搜索空域周期长、不能在复杂气象条件下工作等。目前,激光雷达已经广泛应用于三维高分辨率成像测绘等。

1.3 雷达系统的分类

雷达的应用十分广泛,经常会遇到各种各样的雷达名称。按照不同的分类准则,有不同的雷达名称,雷达初学者容易造成混乱。下面对雷达工程及应用领域中常见的雷达名称进行了基本的归类^[10~13]。本章 1.5 节对主要雷达的用途进行了介绍。

1. 按雷达的用途分类

按用途可将雷达分为军用雷达和民用雷达两大类。

军用雷达是指用于军事领域的雷达。根据雷达的安放地点或雷达所在平台的不同,军用雷达可分成地面雷达、舰载雷达、机载雷达和星载雷达等。

军用雷达还可以按照用途进行更进一步的细分。例如:早期预警雷达(超远程雷达)、搜索和警戒雷达、指挥引导雷达(监视雷达)、火控雷达、制导雷达;机载预警雷达、机载截击雷达、机载护尾雷达、机载导航雷达、机载火控雷达;无线电高度表、雷达引信等。其中机载导航雷达和无线电高度表等也可作为民用。

民用雷达是指用于非军事领域的雷达,主要有遥感雷达、气象雷达、空中交通管制雷达和港口交通管制雷达等。

2. 按雷达的工作体制分类

根据雷达系统及其子系统的工作体制可进一步地细分。按照天线的特性或扫描方式,可分为圆锥扫描雷达、相控阵雷达、频扫雷达、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)和逆合成孔径雷达(Inverse SAR, ISAR)等;按雷达调制信号的波形可分为脉冲雷达、连续波雷达、线性调频雷达、编码雷达、噪声雷达等;按角度跟踪方式可分为圆锥扫描雷达、单脉冲雷达和隐蔽锥扫描雷达等。接收/发设备的位置可分为单基地雷达、双基地雷达和多基地雷达等;按雷达系统是否发射电磁波可分为有源雷达和无源雷达等(在本书中均指有源雷达)。

3. 按信号处理方式分类

按照雷达信号处理方式常可分为脉冲多普勒(Pulsed Doppler, PD)雷达、动目标显示(Moving Target Indication, MTI)雷达、频率分集雷达、极化分集雷达、相参或非相参积累雷达、合成孔径雷达和逆合成孔径雷达等。

4. 按雷达工作波长分类

以波长来称呼雷达,也是一种常用的分类法,如米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达和毫米波雷达、激光/红外雷达等;或者用波段的名称来分类,如 L 波段雷达、S 波段雷达、X 波段雷达等。

5. 按雷达测量目标坐标参数分类

此外还可以按目标坐标参数分为两坐标雷达、三坐标雷达、超视距雷达、测速雷达、测高雷达和成像雷达等。

6. 按某种特殊用途对雷达命名

还有的按某种特殊用途对雷达进行命名,如边扫描边跟踪雷达、目标特征信号测量雷达、探地雷达、二次雷达等。

1.4 雷达的起源和发展

从最基本的雷达雏形到现在各种功能完善的复杂雷达系统,雷达的发展已有 100 多年的历史。本节对雷达历史的主要脉络及重大事件做简要介绍。

1.4.1 雷达的起源

19 世纪后期,电磁波理论的建立和电磁波实验的突破,为雷达的产生奠定了基础。

1865 年,麦克斯韦理论上预言了电磁波的存在;1886 年,赫兹实验上证明了电磁波的存在,1889 年,实现了电磁波的产生、接收和目标散射。这些成就为雷达的产生奠定了基础。

20 世纪初至 20 年代:第一部雷达的发明和人们对雷达用途的探索。

1904 年 4 月 30 日,德国的克里斯琴·赫尔斯迈耶(Christian Huelsmeyer)在英格兰申请了一项名为“telemobiloscope”的专利,用于防止轮船之间的碰撞。这是一个利用无线电波来探测远处金属物体的发射机—接收机系统。图 1-2 所示为该装置及其发明者。尽管该系统最初并没有考虑测距功能,但这一系统仍然被认为是世界上的第一部雷达。

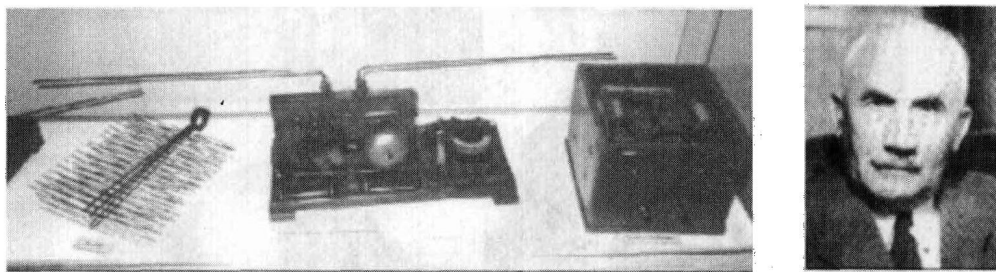


图 1-2 世界上第一部雷达及其发明者

1922 年,无线电先驱者之一,马可尼(S. G. Marconi)在美国无线电工程师协会(IRE,即现在 IEEE 的前身)的一篇论文中,曾提到在其实验中用无线电波观测到目标,他并建议对这种技术加以开发利用^[2]。同年,美国海军研究实验室(NRL)的泰勒(A. H. Taylor)和杨(L. C. Young)观测到轮船的起伏回波,他们的实验系统被称为连续波(CW)干涉系统。实际上,这就是今天的双站(bistatic,也叫做双基地)CW 雷达。

1927 年,德国的赫尔曼(Hans E. Hollmann)对赫尔斯迈耶的装置进行改进,制造了第一部工作在厘米波段的发射—接收机,它被认为是“微波”(Microwave)雷达和通信系统的前身。赫尔曼等三人开发完善的系统,可以探测到 8km 远的轮船和在 500m 高空飞行 30km 远的飞机。以后,上述系统分别形成了舰载(Seetakt)和地基(Freya)两个系列的雷达,Seetakt 雷达工作频率为 500MHz, Freya 雷达工作频率则为 125MHz。这两类雷达如图 1-3 所示。

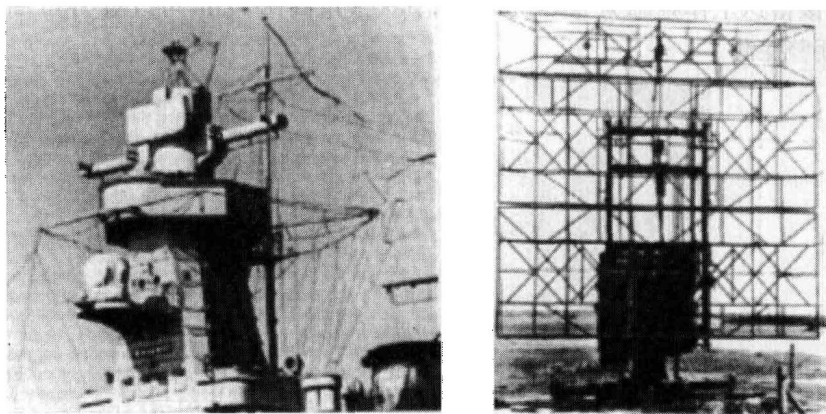


图 1-3 Seetakt 舰载(左)和 Freya 地基(右)系列雷达

在雷达实用于探测飞机之前,第一次世界大战中,法国人曾最早用声音探测装置对来袭飞机进行告警。20 世纪 20 年代,英国建造了大量钢筋混凝土结构的声探测装置,将其用于国土防御。典型的声探测装置如图 1-4 所示,据称这种声探测装置可以探测 25km 外飞行中的飞机^[18]。到 1936 年以后,雷达功能日益强大,人们意识到这种飞机预警装置,不会比使用无线电波进行探测的雷达具有更大的发展前途。