

LEIDA CELIANG YU YINGYONG

雷达测量与应用

杨英科 李宏 许宝民 等编著

RADAR



国防工业出版社

National Defense Industry Press

雷达测量与应用

杨英科 李 宏 许宝民 编著
邓云凯 张宏伟 刘继东

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

雷达测量与应用/杨英科,李宏,许宝民编著. —北京:国防工业出版社,2011.4

ISBN 978-7-118-07417-8

I. ①雷... II. ①杨... ②李... ③许... III. ①雷达-测量系统 IV. ①P225.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 051555 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880 × 1230 1/32 印张 9½ 字数 273 千字

2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

近期的几次局部战争证明,以电子战为主要形式的信息化战争逐步成为战争的主导形态。在以信息为核心,以网络为平台的高技术信息化战争中,信息、信息系统、信息化平台逐步成为战场上的主战装备,能否对战场态势信息进行实时感知与有效应用成为决定战争胜负的关键。雷达作为迄今为止最有效、最可靠的远程无线电探测装备,在作战应用的需求牵引下,在微电子技术、计算机技术、通信技术和信号处理技术推动下,获得了迅猛发展,成为现代及未来信息化战场电子战领域的骨干装备。本书正是基于现代雷达的技术特点及作战应用需求,对雷达的检测、测量、信号处理、数据处理、反侦察与抗干扰等技术进行了系统的研究和介绍。

全书共分8章。第1章为绪论,对雷达发展历程、分类、系统组成、主要战术技术性能和未来的发展趋势进行了简要介绍;第2章为雷达电波传播,主要对雷达电波的传播环境,以及各种大气环境对雷达检测与测量的影响进行了分析和介绍;第3章为检测统计基础,对雷达系统的噪声统计特性、点目标回波信号的统计特性、面目标回波信号的统计特性以及雷达检测理论进行了分析和介绍;第4章为测量技术,对雷达的距离测量原理、角度测量原理、高度测量原理、速度测量原理、RCS测量原理、一维/二维/三维像的测量原理进行了分析和介绍;第5章为信号处理技术,对现代雷达信号处理中的正交相位检波、脉冲压缩处理、动/静杂波抑制、相参积累、阵列信号处理、自适应旁瓣对消与旁瓣匿影、恒虚警检测、高分辨距离成像处理和二维成像处理的原理、技术进行了分析和介绍;第6章为数据处理技术,把雷达的数据处理技术分为

补偿型数据处理和识别型数据处理,并分别对各种数据处理技术与处理中的坐标系选择及转换进行了介绍;第7章为反侦察与抗干扰技术,主要包括雷达反侦察技术、抗干扰技术、组网技术等;第8章为抗反辐射攻击技术,在分析介绍反辐射武器及反辐射攻击原理的基础上,重点对雷达有源诱偏的原理与技术进行了分析和介绍。

本书属于电子信息装备及应用领域的著作,是作者多年理论研究和工程实践的总结,内容及编排新颖,系统性强,对现代雷达及雷达电子战装备的研制与应用均具有广泛的指导意义,具有较高的学术水平和应用参考价值。

在本书编写的过程中,参考借鉴了多名专家学者的著作和科技文献,汲取了先进的学术观点,这些成果为本书的编写奠定了坚实的基础,在此表示诚挚的感谢。另外,还要感谢王仁春、刘亚生、王志清、张磊、俞静一、周颖等同志对编写工作的大力支持,黄默、冯锦、宋胜利、郭雷、刘磊、吴新、石长安、朱少广、何芳、徐阳、邢晖、谭志强、郑腾等为本书提供了大量的资料和信息,黄默高工、赵玉奎高工对全书进行了校对,在此一并表示感谢。

受作者水平限制,书中可能存在不少的缺点和错误,敬请读者批评指正。

作者

2011年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 发展历程	1
1.1.1 电磁波的发现	1
1.1.2 雷达的出现与发展	3
1.2 雷达分类	5
1.3 雷达系统组成	12
1.3.1 信号产生分系统	13
1.3.2 发射分系统	13
1.3.3 接收分系统	14
1.3.4 信号处理分系统	14
1.3.5 数据处理分系统	15
1.3.6 终端显示分系统	15
1.3.7 主控分系统	18
1.3.8 数据录取分系统	18
1.3.9 目标模拟分系统	19
1.3.10 波控分系统	20
1.3.11 天馈分系统	20
1.3.12 电源分系统	21
1.3.13 辅助分系统	22
1.4 雷达主要战术技术性能	22
1.4.1 主要战术技术性能	22
1.4.2 雷达方程	24
1.5 雷达技术发展趋势	26
1.5.1 雷达面临的威胁	26

1.5.2 雷达技术发展趋势	34
参考文献	36
第2章 雷达电波传播	37
2.1 概述	37
2.1.1 雷达电波传播环境	37
2.1.2 雷达环境对雷达电波传播的影响	38
2.1.3 雷达电波各波段主要特点	40
2.1.4 雷达电波传播方式及所受环境影响	43
2.2 地(海)面环境与雷达电波特性	44
2.2.1 地、海面反射	45
2.2.2 多径干涉效应	46
2.2.3 地面障碍绕射	49
2.2.4 地、海杂波	51
2.3 对流层环境与雷达电波特性	52
2.3.1 大气折射及误差修正	52
2.3.2 大气衰减	59
2.3.3 大气波导传播基本条件	61
2.4 电离层环境与雷达电波特性	63
2.4.1 法拉第极化旋转效应	63
2.4.2 电离层传播时延及色散	63
2.5 环境噪声	64
2.5.1 大气吸收噪声	64
2.5.2 宇宙噪声	64
2.5.3 雷电噪声	65
2.5.4 人为噪声	65
参考文献	65
第3章 检测统计基础	67
3.1 雷达系统噪声分析	67
3.1.1 概述	67
3.1.2 检波前后噪声分析	68
3.1.3 采集噪声序列分析	70

3.2	点目标回波信号特征分析	73
3.2.1	噪声中的信号特征与检测	73
3.2.2	杂波中的信号特征与检测	76
3.3	面目标回波信号特征分析	81
3.3.1	分布式目标回波信号特征与检测	81
3.3.2	孤立目标回波信号特征与检测	84
3.4	检测理论	86
3.4.1	引言	86
3.4.2	二元检测	87
3.4.3	判决准则	88
3.4.4	多次观测的二元检测	89
	参考文献	90
第4章	测量技术	91
4.1	距离测量	91
4.1.1	基本原理	91
4.1.2	测距精度	93
4.1.3	测距分辨率	95
4.1.4	测距模糊处理	95
4.2	角度测量	97
4.2.1	相位干涉仪测角原理	97
4.2.2	最大信号法测角	99
4.2.3	单脉冲测角	100
4.2.4	数字波束形成技术测角	102
4.2.5	测角精度	103
4.3	高度测量	105
4.3.1	陆基雷达测高原理	105
4.3.2	机载雷达测高原理	105
4.4	速度测量	107
4.4.1	多普勒测速	107
4.4.2	差分测速	108
4.4.3	组合法测速	108

4.5	RCS 测量	109
4.5.1	回波功率比较法	109
4.5.2	信噪比比较法	110
4.5.3	比较法测量 RCS 的精度分析	111
4.6	像测量	111
4.6.1	距离像测量	112
4.6.2	二维像测量	113
4.6.3	三维像测量	120
	参考文献	120
第 5 章	信号处理技术	121
5.1	正交相位检波	121
5.2	脉冲压缩处理	123
5.2.1	概述	123
5.2.2	脉冲压缩原理	124
5.2.3	脉冲压缩的实现方法	126
5.2.4	几种典型的脉冲压缩信号	130
5.3	杂波抑制技术	134
5.3.1	静止杂波的抑制	134
5.3.2	运动杂波的抑制	137
5.3.3	地面低速目标的检测	139
5.3.4	切向飞行目标的检测	141
5.4	相参积累	141
5.5	阵列信号处理	144
5.5.1	阵列信号模型	144
5.5.2	波束形成	145
5.5.3	阵列信号处理中的角度高分辨	150
5.5.4	空时自适应信号处理(STAP)	154
5.6	自适应旁瓣对消与旁瓣匿影	160
5.6.1	自适应旁瓣对消概述	160
5.6.2	自适应旁瓣对消的实现	161
5.6.3	几个影响自适应旁瓣对消性能的因素	162

5.6.4 旁瓣匿影	165
5.7 恒虚警检测	166
5.7.1 单元平均恒虚警检测(CA - CFAR)	167
5.7.2 有序统计量恒虚警检测(OS - CFAR)	169
5.7.3 杂波图恒虚警检测	170
5.8 高分辨距离像	172
5.8.1 合成的高分辨距离像	172
5.8.2 速度对高分辨力距离像的影响	174
5.8.3 合成的高分辨距离像补偿方法	177
5.9 距离—方位二维高分辨像	182
5.9.1 合成孔径雷达	182
5.9.2 逆合成孔径雷达	187
参考文献	195
第6章 数据处理技术	197
6.1 补偿型数据处理	197
6.1.1 点迹数据处理	197
6.1.2 航迹数据处理	202
6.1.3 图像数据处理	211
6.2 识别型数据处理	221
6.2.1 统计识别处理	221
6.2.2 模糊识别处理	222
6.2.3 神经网络识别处理	222
6.3 数据处理中的坐标系选择	222
6.3.1 常用坐标系	222
6.3.2 坐标转换	225
6.3.3 处理坐标系选择	227
参考文献	232
第7章 反侦察与抗干扰技术	233
7.1 雷达反侦察技术	233
7.1.1 空域反侦察技术	235
7.1.2 频域反侦察技术	235

7.1.3	能域反侦察技术	237
7.1.4	时域反侦察技术	238
7.1.5	极化域反侦察技术	239
7.1.6	信号域反侦察技术	239
7.1.7	其他反侦察技术	240
7.2	雷达抗干扰技术	241
7.2.1	抗干扰技术	241
7.2.2	雷达反隐身技术	243
7.3	雷达组网技术	245
7.3.1	基本概念	245
7.3.2	雷达网构建基础	246
7.3.3	雷达网主要战技性能评价	251
	参考文献	253
第8章	抗反辐射攻击技术	254
8.1	反辐射威胁	254
8.1.1	反辐射武器	254
8.1.2	反辐射攻击过程	256
8.1.3	反辐射武器发展趋势	258
8.1.4	典型反辐射武器	260
8.2	雷达有源诱偏技术	264
8.2.1	概述	264
8.2.2	诱偏原理	265
8.2.3	诱偏模式	272
8.2.4	诱偏系统	275
	参考文献	280
附录 A	雷达频段符号对照表	282
附录 B	美军电子信息装备命名规则	283
	缩略语	285

第 1 章 绪 论

雷达(Radio detection and ranging, Radar)是利用无线电波对目标进行探测和定位的装置^[1]。它是在作战应用的需求牵引下,在微电子技术、计算机技术、通信技术和信号处理技术推动下发展起来的迄今为止最有效、最可靠的远程无线电探测装备。它主要利用目标对电磁波的散射特性实施探测和定位。对其作战性能的考核和评估一般可以从威力、精度、多目标能力和抗干扰性能等几个方面来进行。本章主要从雷达的发展历程、雷达分类、雷达系统组成、雷达主要战术技术性能和雷达技术发展趋势等方面进行介绍。

1.1 发展历程

1.1.1 电磁波的出现

电磁波是以波动方式在空间传播的交变电场和磁场。它的发现为雷达的概念研究和装备研制奠定了基础。

1820 年,丹麦物理学家奥斯特第一次发现了电能生磁现象。

1831 年,英国物理学家法拉第发现了电磁感应现象。

1864 年,英国科学家麦克斯韦在总结前人经验的基础上,首次预言了电磁波的存在,并建立了电磁场基本方程,用数学语言表述了“变化的电场产生磁场,变化的磁场产生电场”的电磁感应理论。

1888 年,德国人赫兹首次证明了电磁波的存在。发表了关于电磁波存在的实验论文,有力支持并验证了麦克斯韦关于电磁场的理论,同时揭示并证明了电磁波传播过程中的反射、折射、偏振等规律和特点。

电磁波的波长与频率之间的关系为

$$f\lambda = c \quad (1-1)$$

式中 f ——电磁波的频率(Hz);

λ ——电磁波波长(m);

c ——光速,电磁波在自由空间传播时, $c=3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

根据上述公式,每一种频率的电磁波有相应的波长。按照频率来分,包括低频、中频、高频、甚高频、特高频、超高频、极高频等;按照波长分,包括长波、中波、短波、米波、分米波、厘米波、毫米波、微米波等。电磁波频谱分类及特性详见图 1-1 和表 1-1。

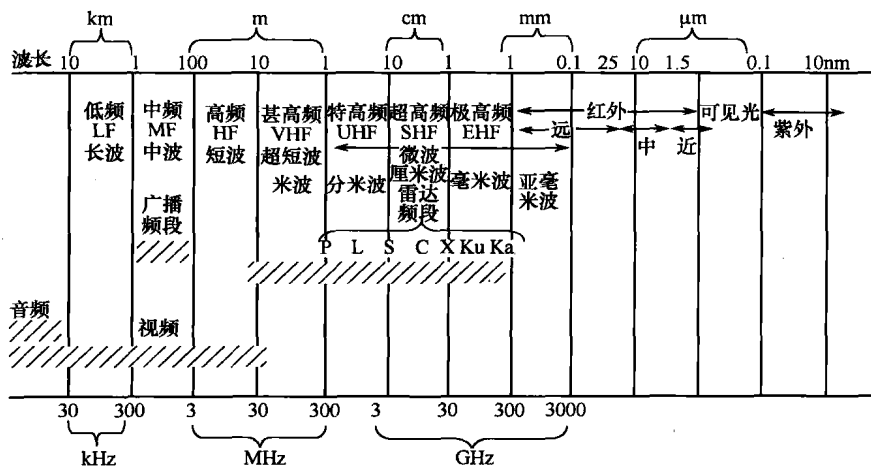


图 1-1 电磁波频谱

表 1-1 无线电频谱对照表

名称	符号	波段	频率	波长	传播特性
甚低频	VLF	超长波	0.3kHz ~ 30kHz	1000km ~ 10km	空间波为主
低频	LF	长波	30kHz ~ 300kHz	10km ~ 1km	地波为主
中频	MF	中波	0.3MHz ~ 3MHz	1km ~ 100m	地波与天波
高频	HF	短波	3MHz ~ 30MHz	100m ~ 10m	天波与地波
甚高频	VHF	米波	30MHz ~ 300MHz	10m ~ 1m	空间波
超高频	UHF	分米波	0.3GHz ~ 3GHz	1m ~ 0.1m	空间波
特高频	SHF	厘米波	3GHz ~ 30GHz	10cm ~ 1cm	空间波
极高频	EHF	毫米波	30GHz ~ 300GHz	10mm ~ 1mm	空间波

1.1.2 雷达的出现与发展

20 世纪初期,德国工程师威尔斯姆耶(Wilsmoy)研制开发了一种包括发射机和接收机的“无线电测量设备”,并用此设备探测到了海上船体反射回来的电磁波,这可能是最早的雷达雏形。

1922 年,意大利工程师马可尼(Marconi)在美国无线电工程师协会上发表了关于利用电磁波进行海上导航的论文,并给出了最初的关于雷达概念的描述:“电磁波是能够被导体所反射的,可以在船舶上设置一种装置,向任何所需要的方向发射电磁波,若碰到导电物体,它就会反射到发射电磁波的船上,由一个与发射机相隔离的接收机接收,以此表明另一船舶是存在的,并进而可以确定其位置。”1924 年,美国物理学家布莱特和图夫通过测量无线电脉冲信号的往返时间对电离层的高度进行了测量。这对马可尼的雷达概念及后来的雷达发展提供了有力的支撑和推动^[2,3]。

到 20 世纪 30 年代,在政府部门及军方的大力支持下,英、美、德、法国等都加大投入,成功开展了无线电波探测物体的试验。这期间,英国的雷达研究成果最为丰硕,其中物理学家沃森—瓦特(Watson - Watt)的研究成果无疑是最具里程碑意义的:首先沃森—瓦特采用布朗阴极射线管观察到了无线电信号,并以电光转换的方式确定了信号的传播时间;随后到 1935 年,沃森—瓦特又设计研制成功了第一部可用来探测飞机的实用雷达:“本土链”对空警戒雷达,该雷达后来部署在英国泰晤士河口附近,其工作频率为 22MHz ~ 28MHz,对飞机的探测距离可达 250km;1938 年,沃森—瓦特还为英国建造了世界上最早的防空雷达网,并在第二次世界大战中为抗击德国对英国的大规模空袭发挥了重要作用。除此之外,1938 年,英国还研制出最早的机载对海搜索雷达 ASV Mark II。同年,美国海军研制出最早的舰载警戒雷达 XAF,安装在“纽约”号战列舰上,对飞机的探测距离为 137km,对舰艇的探测距离大于 20km。在此期间,苏联、德国、日本等国也各自研制出本国的雷达用于战争。受器件发展水平的限制,这一时期的雷达主要工作于 HF、VHF 波段,其典型代表是美国海军研究所研制的 SCR - 268 精密跟踪雷达(图 1 - 2),它用于控制探照灯在夜间照射目标,引

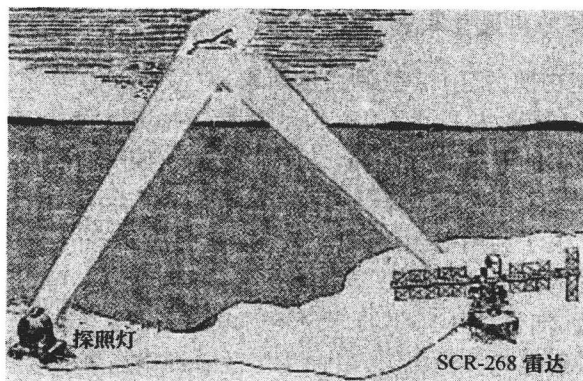


图 1-2 SCR-268 精密跟踪雷达

导高射炮对目标射击,但它还需手动控制高射炮跟踪目标。该雷达及其主要战术技术性能如下^[2]。

工作频率:205MHz

作用距离:36km

峰值功率:50kW

信号体制:脉冲体制

重复频率:4098Hz

脉冲宽度:7 μ s ~ 15 μ s

第二次世界大战期间,由于多腔磁控管的研制成功和微波技术的发展,出现了微波雷达。它具有测量精度高、体积小、操作灵活等优点,因此在武器控制、炮位侦察、投弹瞄准等方面得到了广泛而深入的应用。这期间,雷达首次应用于军事作战,且雷达波段逐步得到了提高,主要工作于 UHF 及其以下波段,部分雷达波段覆盖到了 L、S 波段。其典型代表是 SCR-270、584 雷达等,详见表 1-2^[2]。

第二次世界大战后,航空和航天技术迅速发展,超声速飞机、导弹、人造卫星和宇宙飞船等都以雷达作为探测和控制的重要手段。雷达新技术层出不穷,单脉冲雷达、动目标显示雷达、多普勒雷达、超视距雷达、双/多基地雷达、合成孔径雷达、脉冲压缩雷达、相控阵雷达等新体制雷达都相继出现并得到广泛应用。

表 1-2 第二次世界大战期间的典型雷达及其战术技术指标

名称	设计或研制单位	主要战术技术指标	备注
CXAM	NRL + 工业部门	195MHz、40dB、 $14^{\circ} \times 70^{\circ}$ 、5r/min、15kW、 $3\mu\text{s}$ 、1640Hz、115.5/82.5km(对轰炸机/战斗机)、A 型显示器	装备时间 1940 年,第一部美国海军装备的雷达
SCR-270 SCR-271	NRL	106MHz、 $28^{\circ} \times 10^{\circ}$ 、1r/min、100kW、 $10\mu\text{s} \sim 25\mu\text{s}$ 、621Hz、 $>165.5\text{km}$ (对轰炸机)、PPI 显示器	搜索警戒雷达
SCR-584	MIT	S 波段: 2.7GHz ~ 2.9GHz、 $>55\text{km}$ (对轰炸机)、PPI 显示器、22.86m/mil	第一部广泛使用的微波炮瞄雷达
SCR-720	MIT	S 波段: 3.3GHz、100kW ~ 150kW、 $0.75\mu\text{s}$ 、1575Hz、 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 、16/7.4km(对轰炸机/战斗机)、B 型显示器、C 型显示器	战斗机载截击雷达

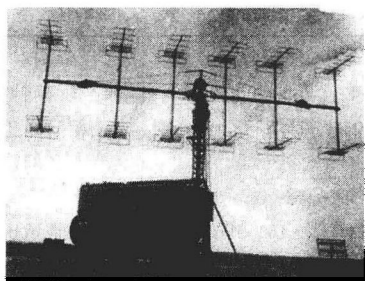
1.2 雷达分类

雷达的分类方式有很多种,可从用途、作战使命、装载平台、技术体制、信号样式、测量目标特性等方面进行划分。在实际的分类应用中,可根据需要采用某种具体的分类方法,也可组合运用多种分类方法。

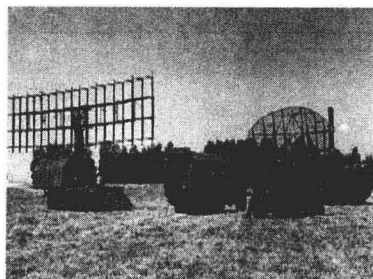
(1)按用途分类。雷达从用途上可分为军用雷达和民用雷达两大类,其中,军用雷达从作战使命上可分为警戒雷达、目标指示雷达、导弹制导雷达、炮瞄雷达、鱼雷攻击雷达、机载截击雷达、机载轰炸雷达、末制导雷达等。

(2)按频率分类。雷达从工作波段上可分为米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达和微米波雷达等,也可分为超视距雷达、微波雷达、毫米波雷达以及激光雷达等。其中,应用较多的主要是厘米波雷达,苏联研制的米波雷达由于性能卓越,在 20 世纪的越南战争、科索沃战争中也发挥了很大的作用。典型米波雷达如图 1-3 所示。

(3)按平台分类。雷达按装载平台可分为地面雷达(包括车载或陆基雷达)、舰载雷达、机载雷达(包括有人机载雷达和无人机载雷



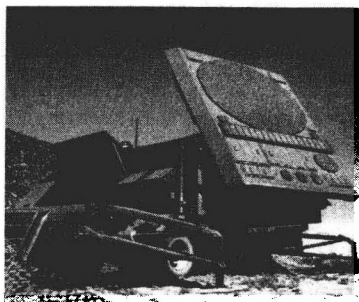
(a) 俄罗斯II-12 雷达



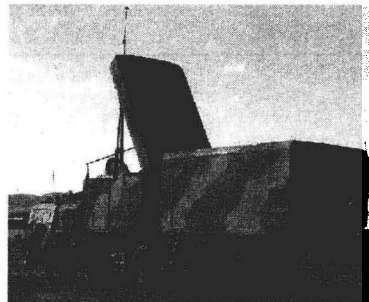
(b) 俄罗斯 IИ13 雷达

图 1-3 典型米波雷达

达)、星载雷达、载雷达(或艇载雷达)等。美国典型车载、机载、星载、舰载及球载雷达如图 1-4~图 1-8 所示。



(a) 美国 AN/MPQ-53 雷达

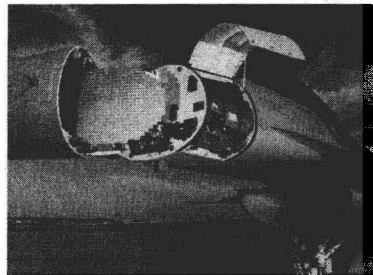


(b) 俄罗斯 S300 雷达

图 1-4 典型车载雷达



(a) 美国 AN/APY-1 预警雷达



(b) 美国 AN/APG-68 火控雷达

图 1-5 典型机载雷达