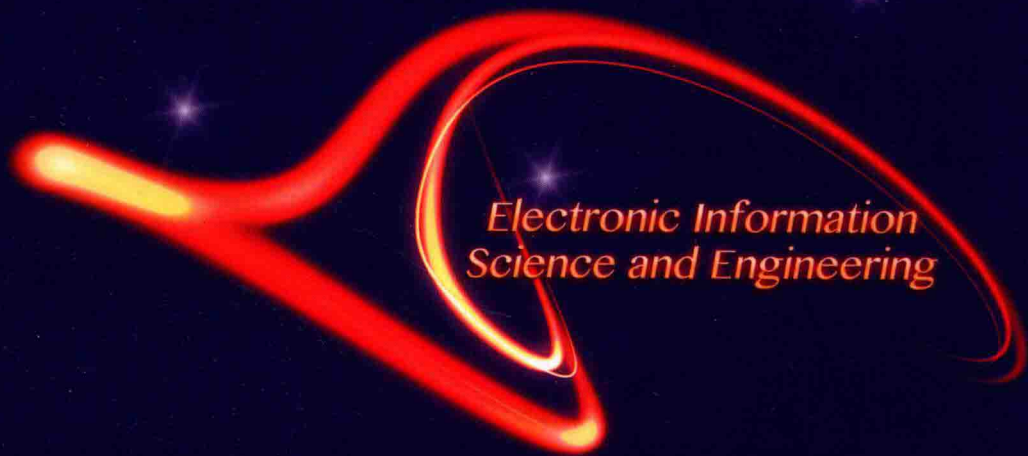




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业精品教材



雷达系统 (第5版)

Radar Systems Fifth Edition

© 张明友 汪学刚 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>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业精品教材

雷达系统

(第5版)

张明友 汪学刚 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

雷达——汇集了现代电子科学技术各学科的成就,是典型的高科技系统。本书全面、系统地论述现代各种类型雷达的构成、功能和应用,所述内容能反映近代雷达变革的新技术和新体制。

全书共 12 章,内容包括:第 1 章导论;第 2 章连续波雷达和单脉冲雷达;第 3 章边扫描边跟踪雷达;第 4 章脉冲多普勒雷达;第 5 章相控阵雷达;第 6 章数字阵列雷达;第 7 章脉冲压缩雷达;第 8 章合成孔径雷达;第 9 章双基地雷达;第 10 章超视距雷达;第 11 章超宽带雷达技术;第 12 章毫米波雷达。其内容是建立在系统收集目前国内外相关研究资料的基础上编写而成的。

本书既论述国内外雷达系统现状,又阐明雷达未来的发展趋势。其原理部分的阐述力求简明,其应用部分紧密联系实际,力求理论性、实用性、系统性和方向性相结合,构成一部总结雷达系统新成果的雷达专业教材。全书内容全面,题材新颖,论述简明,由浅入深,注重基本理论与实际应用的联系,可作为高等院校电子工程等相关专业本科生和硕士研究生的教材,也可供从事电子和雷达工程的科技人员参考。

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/张明友,汪学刚编著. —5 版. —北京:电子工业出版社,2018.5

ISBN 978-7-121-33956-1

I. ①雷… II. ①张… ②汪… III. ①雷达系统—高等学校—教材 IV. ①TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 065498 号

策划编辑:王晓庆 陈晓莉

责任编辑:王晓庆

特约编辑:陈晓莉

印 刷:北京盛通印刷股份有限公司

装 订:北京盛通印刷股份有限公司

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:787×1092 1/16 印张:29.5 字数:868 千字

版 次:2001 年 5 月第 1 版

2018 年 5 月第 5 版

印 次:2019 年 2 月第 2 次印刷

定 价:79.00 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 zlt@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:wangxq@phei.com.cn。

第5版前言

信息科技的迅猛发展已成为世界科技变革发生和发展的驱动力量,雷达在现代高科技战场上的地位和作用尤其突出。雷达作为一种感知器,能够感知人眼无法感知的对象,被称为“千里眼”,在发现目标、测距、测速、成像和识别目标属性等任务中都离不开它。在军事上,各种先进的武器装备离开了雷达所提供的信息支持,其效能都将难以高效地发挥。在民用上,雷达涉及天文、地理、气象、测绘、交通等领域,它是集中了现代电子科学技术各学科成就的高科技系统,其军事和民用的巨大发展潜力和应用前景使雷达受到国内外广泛关注,因此各国都在竞相发展各种类型的雷达装备。

本教材可供电子工程有关专业的本科生作为教材和毕业设计参考资料,也可供硕士研究生作为教材,同时对电子工程类科技人员也是重要的参考资料。

在2001年我们所编《雷达系统》(高等学校电子工程类规划教材)原书和2006年、2011年和2013年经修改的第2版、第3版和第4版基础上,第5版删减了第4版中第2章(雷达中信号检测过程)和第9章(天基雷达(SBR)系统和技术),并在搜索国内外大量新文献、参考了诸如P. E. Pace著《低获概率雷达的检测与分类(第2版)》^[34]等著作后,对原书做了较大的修改和增订,以满足雷达技术迅速发展和现代教学的需要。全书共分12章:第1章导论;第2章连续波雷达和单脉冲雷达;第3章边扫描边跟踪雷达;第4章脉冲多普勒雷达;第5章相控阵雷达;第6章数字阵列雷达;第7章脉冲压缩雷达;第8章合成孔径雷达;第9章双基地雷达;第10章超视距雷达;第11章超宽带雷达技术;第12章毫米波雷达。

在改编本书时我们注意了以下几点:

- (1) 坚持由浅入深的原则,所述内容能反映当前雷达变革的新技术和新体制。
- (2) 在所介绍的各种类型的雷达中,各章具有独立性,根据教学需求和教学时数的多少,可取舍各章节内容,50学时课程的本科生的重点为第1~5章、第7章和第8章。其余各章可作为该专业毕业设计的参考资料和供硕士研究生使用。
- (3) 为反映未来雷达技术的发展,在改编本教材时,增添或拓宽了数字阵列雷达、超宽带雷达和毫米波雷达等章,并在当前具有代表性的两类体制——相控阵雷达和合成孔径雷达两章中引入了多个应用实例,供硕士研究生和科技人员参考。
- (4) 本书是在前续“雷达原理”课程基础上编写的,有关雷达原理及雷达各分系统在本书中不再重述。

本书受电子科技大学“十三五”规划研究生教材建设资助出版。

本书除第4章由汪学刚教授编写外,其余章节都由张明友教授编写。在编写过程中,

郑小亮硕士和陈辅新副教授为书稿做了认真、仔细的校正,在此表示感谢!此外,我们还得到了肖先赐教授、王建国教授、邱文杰教授、周正欧教授、吕幼新教授、张伟研究员、陈祝明教授、姒强副教授、江朝抒副教授、王洪副教授、周云副教授、邹林副教授、钱璐副研究员等的帮助,在此对他们表示谢意!谨以本书献给已故前主编向敬成教授。

由于作者水平有限,难免有疏漏与不当之处,敬请读者提出批评并指正。

编 著 者
2018 年 4 月

目 录

第 1 章 导论	1
1.1 现代雷达发展史上的一些重大事件	1
1.2 雷达技术发展现状	3
1.3 雷达的主要性能指标和技术参数	5
1.3.1 概述	5
1.3.2 主要战术性能指标和技术参数	7
1.3.3 雷达战术、技术性能与技术参数的关系	14
1.4 雷达的威力范围与低被截获概率性能	21
1.4.1 雷达的威力范围	21
1.4.2 低(被)截获概率雷达及其关键技术	23
1.5 电子战及有关雷达对抗概述	27
1.5.1 电子战名称内涵	27
1.5.2 雷达干扰和抗干扰的若干领域简介	29
1.5.3 对雷达的侦察与干扰	29
1.5.4 雷达的反侦察和反干扰	30
1.5.5 赛博时代的电子战	31
1.5.6 对雷达的隐身和雷达的反隐身技术	32
1.6 未来雷达新概念和雷达系统功能发展趋势	34
1.6.1 未来雷达新概念	34
1.6.2 雷达系统功能发展趋势	37
第 2 章 连续波雷达和单脉冲雷达	40
2.1 距离—延时和速度—多普勒的基本关系	40
2.2 简单连续波雷达系统	41
2.3 调频连续波雷达	42
2.4 调相连续波雷达	48
2.4.1 二进制相位编码调制概念	48
2.4.2 相位编码调制连续波雷达	49
2.5 圆锥扫描(顺序天线波束转换)雷达简介	51
2.6 单脉冲(同时天线波束转换)雷达	53
2.6.1 振幅和差单脉冲雷达	53
2.6.2 相位和差单脉冲雷达	61
2.6.3 单通道和双通道单脉冲雷达	62
2.6.4 锥脉冲雷达	63
2.7 特殊单脉冲技术	64
2.7.1 高距离分辨力单脉冲	64
2.7.2 双波段单脉冲雷达	65
2.8 跟踪精度	65

2.8.1	距离跟踪精度	66
2.8.2	角度跟踪精度	67
第3章	边扫描边跟踪雷达	70
3.1	概述	70
3.2	雷达信息二次处理的任务	72
3.3	目标航迹的外推与滤波原理	74
3.3.1	二次处理系统输入信号的统计特性	74
3.3.2	常规的目标坐标和运动参数的外推与滤波原理	75
3.3.3	匀速直线运动目标航迹的外推	78
3.4	航迹参数的递推式滤波(平滑)	80
3.4.1	卡尔曼滤波	81
3.4.2	卡尔曼一步预测	84
3.4.3	用于雷达跟踪的卡尔曼滤波算法	85
3.4.4	α - β 滤波器	87
3.5	航迹建立与航迹相关	89
3.5.1	航迹的建立和终止	89
3.5.2	目标航迹的相关	91
3.5.3	二次处理的典型算法流程	96
第4章	脉冲多普勒雷达	98
4.1	脉冲多普勒雷达基本概念	98
4.1.1	PD雷达的定义	98
4.1.2	PD雷达的分类	98
4.2	脉冲多普勒雷达的杂波	100
4.2.1	PD雷达的性能指标	100
4.2.2	机载下视PD雷达的杂波谱	101
4.2.3	三种PD雷达脉冲重复频率选择的比较	108
4.3	脉冲多普勒雷达的基本组成	112
4.4	脉冲多普勒雷达的信号处理	113
4.4.1	概述	113
4.4.2	抑制各种杂波的滤波器和恒虚警处理(CFAR)	115
4.4.3	滤波器组的具体处理方法	118
4.5	脉冲多普勒雷达的数据处理	122
4.5.1	脉冲多普勒雷达的跟踪	122
4.5.2	测距和测速模糊的解算	128
4.6	脉冲多普勒雷达的距离性能	135
4.6.1	影响PD雷达距离方程的主要因素	135
4.6.2	PD雷达的距离方程	137
4.6.3	PD雷达与常规脉冲雷达距离性能的比较	138
第5章	相控阵雷达	139
5.1	相控阵列的基本原理	139
5.2	相控阵雷达的基本组成	144

5.3	相位扫描系统的组成及工作原理	145
5.3.1	阵列的组态和馈电方式	145
5.3.2	移相器	148
5.3.3	波束指向控制器	152
5.3.4	波束形成网络	156
5.3.5	雷达管理器	167
5.4	有源相控阵雷达	168
5.4.1	概述	168
5.4.2	固态 T/R 组件的基本组成	170
5.4.3	有源阵列的结构体系	172
5.4.4	T/R 组件与馈电网络的统一设计及设计中参考架构的应用	176
5.5	有源相控阵雷达在第四代战斗机中的应用	180
5.5.1	有源相控阵技术	181
5.5.2	天线配置分布情况	183
5.5.3	火控雷达技术	186
5.5.4	综合系统设计技术	186
5.6	有源相控阵雷达在机载预警和导弹防御系统中的应用	188
5.6.1	机载预警雷达简介	188
5.6.2	导弹防御系统概述	189
5.6.3	陆基弹道导弹预警相控阵雷达(UWR)简介	190
5.6.4	陆基雷达(GBR)	191
5.7	陆基监视和跟踪相控阵雷达的观测空域和搜索与跟踪方式	195
5.7.1	雷达观测空域	195
5.7.2	陆基空间相控阵雷达的搜索方式	199
5.7.3	相控阵雷达的跟踪工作方式	201
5.8	相控阵雷达技术的优缺点及发展趋势	205
第 6 章	数字阵列雷达	211
6.1	概述	211
6.2	数字阵列雷达的主要组成	211
6.2.1	主要组成	211
6.2.2	一部数字阵列雷达实验样机	213
6.3	数字阵列雷达的阵列数字化要求	220
6.3.1	数字阵列雷达的 4 种工作模式简介	220
6.3.2	数字阵列雷达的动态范围	222
6.4	数字阵列雷达中的一些关键器件简介	225
6.5	数字波束形成	231
6.5.1	接收数字波束形成	231
6.5.2	FPGA 数字波束形成器的实现概念	232
6.5.3	一个由 FPGA 结合 DSP 实现 8 个阵元的数字波束形成器的例子	233
6.5.4	一部 32 个通道的即插即用 X 波段数字波束形成接收阵列的例子	236
6.5.5	发射数字波束形成	239

6.6	数字雷达接收机和发射机原理	240
6.6.1	数字接收机的组成	240
6.6.2	几种数字接收机方案简介	242
6.6.3	基于 Xilinx FPGA 的数字接收机简介	242
6.6.4	雷达数字发射机原理简介	243
6.7	分集的 MIMO 数字阵列雷达概念	244
6.7.1	概述	244
6.7.2	一种采用并置天线和编码信号的 MIMO 雷达	245
6.7.3	分集的(或称统计的)MIMO 雷达	246
6.8	基于子阵列发射阵列的 MIMO 阵列布阵优化研究	251
6.8.1	简介	251
6.8.2	动态发射子阵结构	252
第 7 章	脉冲压缩雷达	259
7.1	概述	259
7.2	线性调频脉冲压缩	263
7.2.1	线性调频脉冲压缩的基本原理	263
7.2.2	线性调频脉冲压缩的频谱特性	266
7.2.3	线性调频脉冲信号数字产生及时域压缩处理	274
7.2.4	线性调频脉冲压缩信号的频域数字压缩处理	276
7.3	非线性调频脉冲压缩	279
7.3.1	非线性调频	280
7.3.2	步进频率调频	280
7.3.3	步进相位调频	280
7.4	相位编码脉冲压缩	282
7.4.1	概述	282
7.4.2	二相编码信号	283
7.4.3	二元伪随机码信号	285
7.4.4	二相编码系统的实现	291
7.4.5	多相编码(Polyphase Code)信号	293
7.4.6	一种相位编码脉冲压缩雷达的信号处理简介	302
第 8 章	合成孔径雷达	304
8.1	概述	305
8.2	合成孔径雷达原理的直观解释	306
8.3	从频谱分析、相关、匹配滤波角度解释合成孔径原理	313
8.4	合成孔径雷达的工作模式	316
8.4.1	概述	316
8.4.2	常用的 SAR 工作模式简介	319
8.5	SAR 处理算法	323
8.5.1	距离徙动概念	323
8.5.2	距离—多普勒(RD)算法	324
8.5.3	Chirp Scaling(CS)算法	326

8.5.4	波数域 ωK 算法	329
8.5.5	频谱分析(SPECAN)算法	330
8.6	常规 SAR 数字信号处理器	331
8.6.1	SAR 成像处理器概述	332
8.6.2	设计 SAR 数字信号处理器例子	334
8.7	合成孔径雷达的系统考虑	337
8.7.1	信号强度考虑	337
8.7.2	主要参数间的互相制约关系	338
8.7.3	相位误差	341
8.8	SAR 全系统组成	342
8.8.1	系统概述	343
8.8.2	数字联机预处理	344
8.8.3	天线	344
8.8.4	控制计算机	344
8.8.5	数据处理机	344
8.9	SAR 的发展趋势	345
8.9.1	SAR 技术现状	346
8.9.2	机载 SAR 的关键技术和发展趋势	346
8.10	逆合成孔径雷达的基本原理简介	348
8.10.1	概述	348
8.10.2	ISAR 成像的机理	349
8.10.3	ISAR 成像关键技术简述	352
8.10.4	ISAR 成像技术的优缺点	357
第 9 章	双基地雷达	359
9.1	概述	359
9.2	双基地雷达的若干基本关系	360
9.2.1	基本要求	360
9.2.2	距离关系	361
9.2.3	面积关系	363
9.2.4	多普勒关系	365
9.3	双基地雷达的应用	366
9.3.1	概述	366
9.3.2	空基有源双基地雷达	367
9.3.3	潜艇艇上部置双基地雷达	371
9.3.4	无源双基地雷达	371
9.4	地面和空间动目标监视用空间双基地雷达的设计考虑	371
第 10 章	超视距雷达	375
10.1	概述	375
10.2	超视距雷达的工作原理	375
10.3	(天波)超视距雷达(OTHR)	379
10.4	天波系统最大探测距离和主要分系统	383

10.4.1	最大探测距离	383
10.4.2	主要分系统简介	385
10.5	一部可重定位短波超视距雷达	387
10.5.1	简述	387
10.5.2	ROTHR 系统组成及其基本性能	388
10.5.3	天波超视距雷达系统面临的挑战	390
10.6	地波 OTHR	391
10.7	海基微波超视距雷达和高频表面波雷达技术	394
10.7.1	海基微波超视距雷达	394
10.7.2	舰载“地”波超视距雷达	394
第 11 章 超宽带雷达技术		396
11.1	概述	396
11.2	超宽带雷达信号及产生方法	396
11.3	超宽带信号的接收机	402
11.4	超宽带天线	404
11.4.1	自由空间中单个阵列单元的辐射	405
11.4.2	自由空间中多个单元的阵列的辐射	407
11.5	超宽带信号的处理技术	408
11.5.1	UWB 雷达信号的相干处理	408
11.5.2	UWB 信号检测	414
11.6	UWB 雷达应用的几个例子	420
11.6.1	用高距离分辨力雷达实现一维成像	420
11.6.2	探地雷达(GPR)	421
11.6.3	一种 UWB 透墙成像雷达	425
11.6.4	地面透视雷达	428
11.6.5	一种探测掠海式导弹的微波 UWB 雷达	429
11.6.6	高功率微波 UWB 防空雷达	430
第 12 章 毫米波雷达		431
12.1	毫米波频段划分	431
12.2	毫米波雷达的特性	431
12.2.1	天线的波束宽度窄	432
12.2.2	多普勒频移宽	434
12.2.3	可用带宽大	434
12.3	传播效应	435
12.3.1	衰减和反射(或散射)	435
12.3.2	多径效应	437
12.4	毫米波雷达系统的静目标探测性能	438
12.4.1	毫米波雷达的一次雷达方程	438
12.4.2	用信噪比(S/N)表示雷达方程	439
12.5	若干毫米波雷达的应用例子	442
12.5.1	Mini-PRV 毫米波监视雷达	442

12.5.2	基于低造价毫米波雷达技术的直升机近场障碍告警系统	443
12.5.3	高精度 35GHz 跟踪雷达 EAGLE	445
12.5.4	机载多传感器中的毫米波雷达	447
12.5.5	俄罗斯和美国的毫米波大型空间监视相控阵雷达	449
12.5.6	美国 AH—64“阿帕奇”和 RAH—66“科曼奇”直升机载 8 毫米波火控相控阵 雷达	451
12.5.7	高分辨力机载毫米波 FM—CM SAR	452
12.6	毫米波雷达的发展趋势	453
参考文献		455

第1章 导 论

雷达(Radar)是“Radio Detection and Ranging”缩写的音译,其基本功能是利用目标对电磁波的散射而发现目标,并测定目标的空间位置。近年来,由于雷达采用了一些新理论、新技术(尤其数字化技术和高速软件编程技术)和新器件,雷达技术进入了一个新的发展阶段。特别是电子计算机的应用,以及各类新型光电集成元器件的出现,给现代雷达带来了根本性的变革。雷达的功能已超出了“无线电检测和测距”的含义,它还可以提取有关目标的更多信息,诸如测定目标的属性、目标的识别等。

雷达是集中了现代电子科学技术各种成就的高科技系统。众所周知,雷达已成功地应用于地面(含车载)、舰载、机载方面,这些雷达已经在执行着各种军事和民用任务。近年来,雷达应用已经向外层空间发展,出现了空间基(卫星载、航天飞机载、宇宙飞船载)雷达。同时雷达也向空间相反方向发展,出现了各种探地雷达,它已经或将要应用于探雷、资源勘探、地下构造“窥探”、地面危险物品侦察等方面。另外,民用各部门诸如气象、天文、遥感测绘、船只导航、直升机和汽车防撞、交通管制等领域中,雷达的应用越来越广泛,而且在数量上民用将远大于军用。总之,雷达应用的完整目录将需要列许多页,而且每年都增加新的条目。不过,应用的主要领域依然如表 1.1 所示。

表 1.1 雷达应用^[3]

空中监视	远程预警(包括机载预警)、地面控制的拦截、武器系统目标截获、测高和三坐标雷达、机场和空中航线监视
空间和导弹监视	弹道导弹告警、导弹截获、卫星监视
表面搜索和战场监视	海面搜索和导航、港口和航道控制、地面测绘、入侵检测、迫击炮和火炮定位、机场飞机跑道控制
跟踪和制导	高射炮火控、机载或舰载火控、导弹制导、靶场测量、卫星测量、精密进场和着陆
气象雷达	降雨和风的观察和预测、气象回避(对飞机)、晴空湍流探测、云能见度指示器
天文和大地测量	行星观测、地球勘测、电离层探测

本章主要介绍雷达的性能参数和技术参数,雷达的对抗和雷达的未来发展。本书的其余各章是在《雷达原理(第4版)》的基础上,首先在导论中对雷达的性能和发展作了概述,然后从第2章起介绍各种雷达系统的组成、工作原理和应用。本书将分别介绍诸如连续波雷达、单脉冲雷达、脉冲多普勒雷达、脉冲压缩雷达、边扫描边跟踪雷达等熟知的雷达,还介绍目前大家关注的相控阵雷达、数字阵列雷达、合成孔径雷达。由于后3种雷达技术上紧密联系,因此这几种雷达在所介绍的相关内容上分别轻重不同地分配在不同章节之中。最后,本书还简要介绍双基雷达、超视距雷达、超宽带雷达和毫米波雷达,它们也是今后发展的潜在雷达。

1.1 现代雷达发展史上的一些重大事件^{[1]、[3]、[5]、[11]}

在第二次世界大战全面开战前夕,诞生了电子新系统——雷达。时至今日,在这风风雨雨的近80年中,雷达经历了许多重大的事件,现作简要回顾。

1864年,英国人麦克斯韦(James C. Maxwell)建立了无线电(电磁)波理论的基本公式。

1886—1888年,德国人海因里奇·赫兹(Heinrich Hertz)验证了麦克斯韦的电波理论,获知

它具有与光波相同的电波传播特性。

1897年,俄国人亚历山大·波波夫验证了利用无线电波可探测物体。

1903—1904年,德国人克里斯琴·赫尔斯迈耶(Christian Hulsmeyer)研制出原始的船用防撞雷达并获得专利权。

1922年,英国人M. G. 马可尼(M. G. Marconi)在接受无线电工程师学会(IRE)荣誉奖章的讲话中,提出了一种船用防撞测角雷达的建议。

1925年,美国人G. 布赖特(G. Breit)和M. 图夫(M. Tuve),通过阴极射线管观测到来自电离层的第一个短脉冲回波。

1934年,海军研究实验室(Naval Research Lab.)的R. M. 佩奇(R. M. Page)拍摄了第一张来自飞机的短脉冲回波照片。

1935年,由英国人和德国人第一次验证了对飞机目标的短脉冲测距。

1937年,由英国人罗伯特·沃森·瓦特(Robert Watson-Watt)设计的第一部可使用的雷达“Chain Home”在英国建成。

1938年,美国陆军通信兵的SCR—268成为首次实用的防空火控雷达,后来生产了3100部。该雷达探测距离大于100海里,工作频率为200MHz。

1939年,研制成第一部实用舰载雷达——XAF,安装在美国海军纽约号(New York)战舰上,对飞机的探测距离为85海里。

1941年12月,那时已生产了100部SCR—270/271陆军通信兵预警雷达。其中一部雷达架设在檀香山,它探测到了日本飞机对珍珠港的入侵。但是,将该反射回波信号误认为是友军飞机,铸成了大悲剧。

1943年,同盟国用装备雷达的舰船来探测德国潜艇的通风管,导致德国海军蒙受重大损失。

20世纪30年代,除英国、美国外,法国、苏联、德国和日本同时致力于雷达的研制。第二次世界大战期间,在英国的帮助下,美国在雷达方面的研制大大地超过了德国和日本,并在保证同盟国的胜利方面发挥了重要作用。在第二次世界大战末期,由于微波磁控管的研制成功和微波技术在雷达中的应用,使雷达技术得到了飞速的发展。与此同时,由于第二次世界大战中雷达所起的作用很大,因此出现了对雷达的电子对抗,研制了大量的各种频段的对雷达进行电子侦察与干扰的装备,并成立了反雷达的特种部队。

从20世纪50年代末以来,由于航天技术的飞速发展,飞机、导弹、人造卫星及宇宙飞船等均采用雷达作为探测和控制手段,因此各种类型飞行器载雷达得到飞速发展。尤其从20世纪末期以来,有源相控阵雷达在第四代和第五代战斗机中的应用,美国在F—22战斗机和F—35联合战斗机中配备以AN/APG—77、AN/APG—79和AN/APG—81为代表的有源相控阵雷达,标志着机载有源相控阵雷达性能已突破,并已可实战应用。另外,在20世纪60年代中期,由于反洲际弹道导弹系统提出了高精度、远距离、高分辨力和多目标测量的要求,使雷达技术进入蓬勃发展的时期。特别是20世纪80年代以后,由于弹道导弹具有突防能力、破坏力大,并能携带子母弹头、核弹头等优越性,而成为现代战争中最具有威胁性的攻击性武器之一。为了对付这一威胁,美国等均加强了对弹道导弹防御系统的研究和部署。

弹道导弹防御系统可分为战区导弹防御(TMD)系统和国家导弹防御(NMD)系统。这类系统是一种将各种反导武器综合在一起的“多层”防御体系。它以陆地、海面 and 空中为基点,全方位地实施拦截任务,在来袭导弹初始段、飞行段或再入段中将入侵导弹等武器予以摧毁。

战略弹道导弹防御系统中,一般由光、电、红外探测分系统,信息传输分系统和指挥控制中心等部分组成。其中,导弹预警中心主要由陆基相控阵雷达网、超视距雷达网、红外预警卫星网和

天基预警雷达网组成四合一的探测系统。这种四合一的战略导弹探测系统,除了能可靠地探测敌方从任意地点发射的战略和战术导弹,提供比较充裕的预警时间及敌方的战略、战术导弹攻防态势信息外,还能提供空间卫星和载人航天器的信息。

表 1.2 列出了不同阶段用于探测弹道导弹等突防兵器常用的雷达及其功能。TMD 和 NMD 系统对雷达的性能和功能提出了很高要求,促使雷达技术的发展迈入更高的发展阶段。

表 1.2 用于探测弹道导弹等突防兵器的常用雷达及其功能

突 防 阶 段	类 型	功 能
初始段 (助推段)	星载雷达	探测
	星载红外遥感	探测导弹发射
	预警机预警雷达	目标探测
	地面远程雷达	目标探测
中段	预警机预警雷达	目标探测
	地面远程雷达	目标探测
再入段	目标(指示)跟踪雷达	引导
	拦截导弹的制导雷达	照射跟踪
	导弹末制导	寻的跟踪

1.2 雷达技术发展现状^{[1]、[5]、[11]、[9]}

强大的军事能力大多源自其接入电磁频谱的能力。获取电磁频谱(EMS)是现代军事行动的先决条件。显然,电磁频谱不应再被视为使能因素,而是一个重要的作战域,与陆、海、空、天域行动等同。因此,电磁频谱已经成为 21 世纪至关重要的作战域。

陆、海、空、天和赛博行动日益依赖对电磁频谱的获取。所有联合功能——机动、火力、指挥控制、情报、防护以及供给均依靠应用频谱的能力。

由于严酷的环境、难对付的目标、稀缺的电磁频谱等诸多挑战,对雷达在多功能和多模式方面的性能需求也相应提高。这就呼唤创新性方法的出现,以更好地利用雷达提供的固有信息。

雷达技术发展现状可概括为以下几个方面。

① 军用雷达面临电子战中反雷达技术的威胁,特别是有源干扰和反辐射导弹的威胁。现在发展了多种抗有源干扰与抗反辐射导弹的技术,包括自适应天线方向图置零技术、自适应宽带跳频技术、多波段公用天线技术、诱饵技术、低截获概率技术等。

② 隐身飞机的出现,使微波波段目标飞机的雷达横截面积 σ 减少得很显著(10^{-2}m^2 量级),则要求雷达的灵敏度相应提高同样量级。目前反隐身雷达已采用低频段(米波、短波等)雷达技术、双(多)基地雷达技术、无源定位技术等。

③ 巡航导弹与低空飞机飞行高度低至 10m 以下,目标横截面积小到 $0.1\sim 0.01\text{m}^2$ 。因此,对付低空入侵是雷达技术发展的又一挑战。采用升空平台技术、宽带雷达技术、脉冲多普勒雷达技术及毫米波雷达技术能有效对付低空入侵。

④ 成像雷达技术的发展,为目标识别创造了前所未有的机会。目前工作的合成孔径雷达分辨率已达 $1\text{m}\times 1\text{m}$, $0.3\text{m}\times 0.3\text{m}$ 的系统已研制成功,为大面积实时侦察与目标识别创造了条件。多频段、多极化合成孔径雷达已投入使用。

⑤ 航天技术的发展为空间雷达技术的发展提供了广泛的机会。高功率的卫星监视雷达、空间基侦察与监视雷达、空间飞行体交会雷达等成为雷达家族新的成员。

⑥ 探地雷达是雷达发展的另一重要方向。目前已有多种体制的探地雷达,用于对地雷、地

下管道探测和高速公路质量检测等目的。树林下及沙漠下隐蔽目标的探测已取得重要的实验成果,UHF/VHF 频段的超宽带合成孔径雷达已取得突破性进展。

⑦ 毫米波雷达在各种民用系统中(如场面监视、海港及边防监视、船舶导航、直升机和无人驾驶汽车的防撞等)大显身手。欧美已开发出 77GHz 和 94GHz 的汽车防撞雷达,为大规模生产汽车雷达创造了条件。在研制的用于自动装置的雷达中,最高频率已达 220GHz。

纵观来看,当前雷达面临着所谓“四大”威胁,即快速应变的电子侦察及强烈的电子干扰;具有掠地、掠海能力的低空、超低空飞机和巡航导弹;使雷达散射面积成百上千倍减小的隐身飞行器;快速反应自主式高速反辐射导弹。因此,对雷达的要求越来越高。首先,它应减少雷达信号被电子环境监测器(ESM)、反辐射导弹(ARM)截获的概率,使雷达信号更难于被这些装置发现和跟踪。同时,雷达应保证实时、可靠地从极强的自然干扰(杂波)和人为干扰中检测大量目标。由于目标的雷达横截面积从很低值(“隐身”目标)到相当高值(大舰只、大飞机或强杂波)的范围内变化,所以还要求雷达有很大的工作动态范围和很高的虚警鉴别力,即使在多目标(如群目标袭击)环境中也如此。此外,还应当采用目标分类和威胁估计,并将被处理的数据有效地传送给电子计算机和终端录取及显示装置,且要简便易行。

“四大”威胁的出现和发展并非意味着雷达的“末日”到来。为了对付这些挑战,雷达界已经并在继续开发一些行之有效的新技术,例如图 1.1 中所列的频率、波束、波形、功率、重复频率等雷达基本参数的捷变或自适应捷变技术;功率合成、匹配滤波、相参积累、恒虚警处理(CFAR)、大动态线性检测器、多普勒滤波技术;低截获概率(LPI)技术;极化信息处理技术;扩谱技术;超低旁瓣天线技术;多种发射波形设计技术;数字波束形成技术等。对抗“四大”威胁必然是上述一系列先进技术的综合运用,而非某一单项技术手段所能奏效。在采用上述新技术的基础上,已经并正在研制各种新体制雷达,诸如,无源雷达、双(多)基地雷达、相控阵雷达、数字阵列雷达、机(或星)载预警雷达、稀布阵雷达、多载频雷达、噪声雷达、谐波雷达、微波成像雷达、毫米波雷达、激光雷达及冲击雷达等,并且与红外技术、电视技术等构成一个以雷达、光电和其他无源探测设备为中心的极为复杂的综合空地一体化探测网,充分利用联合监视网在频率分集、空间分集和能量分集上的特点,在实现坐标和时间的归一化处理基础上,达到互相补充和信息资源共享。由于提取的是来自若干传感器的信息,而不是其中一个传感器单独给出的数据,所以大大提高了系统的目标测量与识别、反隐身、抗干扰和反摧毁的能力,从而使“四大”威胁同样会面临极度的困境。这就是事物发展的规律,雷达技术和反雷达技术必将在相互斗争中前进和发展。

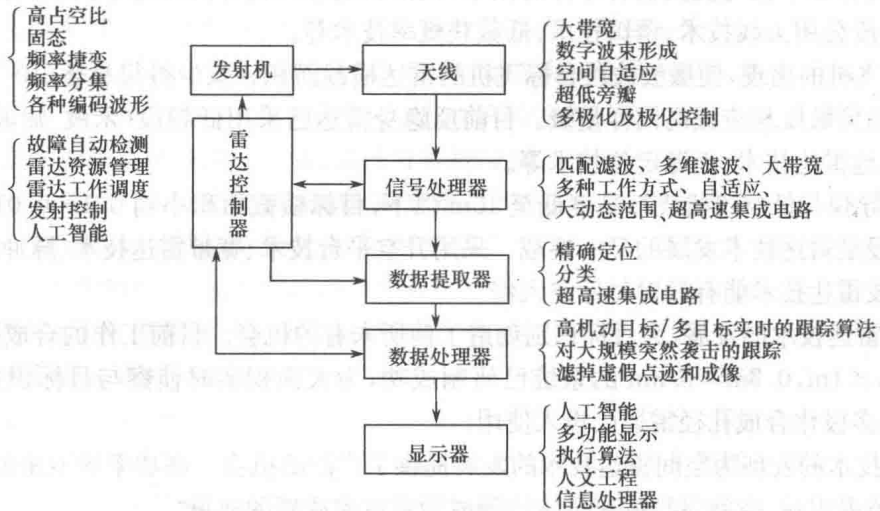


图 1.1 雷达各主要部分可采用的先进技术的归纳表示图

当前对于雷达的另一个要求是多功能与多用途。在现代雷达应用中,由于作战空间和时间的限制,加之快速反应能力的要求和系统综合性的要求,雷达必须具备多功能和综合应用的能力。例如,要求一部雷达能同时对多目标实施搜索、截获、跟踪、识别及武器制导或火控等功能;要求雷达与通信、指挥控制、电子战等功能构成综合体。它涉及综合(共享)孔径天线技术,综合射频系统技术,综合信号处理和综合数据处理技术,光电子技术以及软件无线电技术等领域的研发。

1.3 雷达的主要性能指标和技术参数^{[1]、[3]、[6]、[9]}

1.3.1 概述

典型脉冲雷达的原理框图如图 1.2 所示。按照常规雷达工程的习俗,雷达可分为 7 个分系统。在比较复杂的系统中,雷达的工作受计算机控制,由同步装置启动各个专门动作,从而控制发射时序、接收机选通和增益调整、信号处理和显示。同步装置控制调制器给射频(RF)放大器加上高压脉冲,与此同时来自激励器的 RF 激励信号加到该放大器上。由此产生的高功率射频脉冲通过传输线送往收发开关,再通过收发开关把能量送往天线向空间辐射。图中所示天线为反射面型。由伺服放大器驱动天线基座并控制其机械转动。天线起着将电磁能量耦合到大气中并接收由目标散射回来的电磁能量的作用,它通常会形成一个集中向某一给定方向传播电磁波的波束。位于天线波束内的物体或目标将会截取一部分传播的电磁能量,且将被截取的能量向各个方向散射,其中有些能量会向雷达的方向反射(反向散射),回波信号重新进入天线,并由双工器与接收机相连。由激励器过来的本振信号将回波频率变换成中频,然后在接收机中进行放大和滤波,之后进行更精细的信号处理。处理后的信号通过一个包络检测器将脉冲波形恢复,并对该波形进行显示或用于进一步的视频处理,从而发现目标并测量其位置、速度等参数。

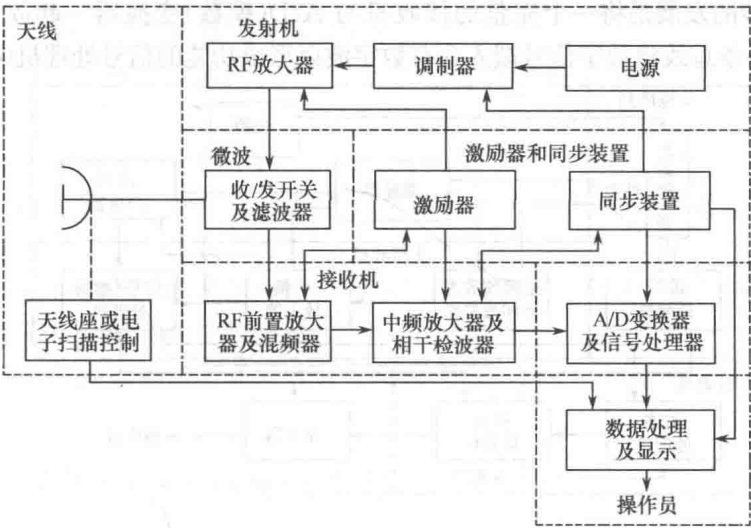


图 1.2 典型脉冲雷达的原理框图

针对具体的雷达应用,图 1.2 中的框图有许多种变化。例如,图 1.3 给出了由计算机控制的现代无源相控阵雷达系统的框图,该系统利用了无源相控阵列。雷达同步器现在是一个专门的数字硬件单元,它接收控制计算机来的信息,并将它们转换成波形选择和定时控制,以及信号处理机采样选通。激励器和调制器也在数字控制下合成载频和波形调制。控制计算机还产生波束切换和处理机选通。波控处理机控制着建立发射波束与接收波束方向与形状的移相器的设置,