

国家重点教材

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

雷达原理

(第四版)

丁鹭飞 耿富录 陈建春 编著



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



www.huaxin.edu.cn
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

雷达原理

(第四版)

本书分为雷达主要分机及测量方法两大部分。前者包括雷达发射机、雷达接收机及雷达终端，书中阐述了它们的组成、工作原理和质量指标；后者包括经典的测距、测角和测速的基本原理和各种实现途径，并相应地讨论了多种雷达体制的基本工作原理，如连续波、三坐标、精密跟踪等。对日益受到重视的相控阵雷达（无源、有源）也有详尽的阐述。运动目标检测部分对强杂波中提取运动目标信号的基本工作原理、精巧的信号处理技术及实现方法均有较深入的讨论，并涉及动目标显示（MTI）及脉冲多普勒（PD）体制的基本原理。高分辨力雷达部分讨论了雷达分辨理论、高距离分辨力信号以及二维分辨力成像雷达SAR和ISAR的基本工作原理。书中对雷达方程也做了全面的研讨，说明了探测距离和内外各种因素的关联。全书充分体现了当前雷达技术的状况和新发展。

本书可作为电子工程有关专业本科生和研究生的教材。因内容涉及较广，可根据需要选用不同章节讲授。本书也可作为雷达工程技术人员的参考书。



策划编辑：韩同平
责任编辑：周宏敏
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 978-7-121-08252-8



9 787121 082528 >

定价：55.00 元

国家重点教材
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

雷达原理

(第四版)

丁鹭飞 耿富录 陈建春 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书分为雷达主要分机及测量方法两大部分。前者包括雷达发射机、雷达接收机及雷达终端,书中阐述了它们的组成、工作原理和质量指标;后者包括经典的测距、测角和测速的基本原理和各种实现途径,并相应地讨论了多种雷达体制的基本工作原理,如连续波、三坐标、精密跟踪等。对日益受到重视的相控阵雷达也有详尽的阐述。运动目标检测部分对强杂波中提取运动目标信号的基本工作原理、精巧的信号处理技术及实现方法均有较深入的讨论,并涉及动目标显示(MTI)及脉冲多普勒(PD)体制的基本原理。高分辨力雷达部分讨论了雷达分辨理论、高距离分辨力信号以及成像雷达SAR及ISAR的基本工作原理。书中对雷达方程也做了全面的研讨,说明了探测距离和内外诸因素的关联。全书较好地体现了当前雷达技术的状况和新发展。

本书可作为电子工程有关专业本科生和研究生的教材。因内容涉及较广,可根据需要选用不同章节讲授。本书也可作为雷达工程技术人员的参考书。

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

雷达原理 / 丁鹭飞, 耿富录, 陈建春编著. —4版. —北京: 电子工业出版社, 2009.3
(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 978-7-121-08252-8

I. 雷… II. ①丁…②耿…③陈… III. 雷达—高等学校—教材 IV. TN951

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第016637号

策划编辑: 韩同平

责任编辑: 周宏敏

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 34.75 字数: 1045千字

印 次: 2009年3月第1次印刷

印 数: 4000册 定价: 55.00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 zlt@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

本书是在 2002 年出版《雷达原理》(第三版)的基础上全面修编而成。

雷达是集中现代电子科学技术先进成果的一个电子系统。20 世纪 80 年代以来,由于微电子技术及各种电子器件的迅猛发展,使雷达的各分机及体系结构不断更新,雷达的数字化推进迅猛并将继续向雷达前端推进。雷达技术及其应用持续向前发展,极大地提高了雷达的性能并显著扩展了它的应用范围。

雷达技术发展值得提出的几个方面如下:

雷达的信号处理机可以做得更为精巧、复杂,再加上对杂波和环境的深入研究,目前雷达可以明显改善严重杂波背景下检测小运动目标的性能。因而动目标显示(MTI)及脉冲多普勒(PD)体制雷达获得比较普遍的应用。

数字技术和新型器件的应用紧密结合,可以比较方便地产生和处理各类复杂信号波形,从而使雷达能同时获取高的目标分辨性能和好的目标探测能力。数据处理也获得相应的快速发展,从而能在目标数据中提取更多的有用信息。在发射、接收和天线分系统中也不断引入了数字技术及采用新型固态器件而使分机有了新面貌。例如,直接数字频率合成器(DDS)的应用、复杂波形产生器、数字接收机(中频正交采样、数字正交鉴相等)、数字波束形成(DBF)及数字阵列等。

相控阵雷达已批量生产和广泛使用,从早期的战略防御到目前的战术使用,包括地面、舰载和机载雷达。因为相控阵雷达的天线波束形状和扫描方式可以灵活、快速形成和变化,再加上数据处理、计算机管理和控制,使相控阵雷达具有多功能、多目标、高数据率和高可靠性等优点。微波固态器件的发展和多个波段 T/R 组件的日趋成熟,加速了有源相控阵雷达的发展和应用。本书的第 2 章“雷达发射机”和第 7 章“角度测量”对此均有深入讨论。

早期的雷达分辨力较低,将普通目标视为“点”目标而只测量其空间坐标及运动参数。从雷达遥感成像、目标识别等用途来讲,需要将目标看得更清楚,即必须明显提高雷达的分辨能力。第 9 章“高分辨力雷达”讨论了雷达分辨理论、具有高距离分辨力的宽频带信号以及提高横向分辨力的综合孔径雷达(SAR)和逆合成孔径雷达(ISAR)的基本工作原理。

雷达作用距离是原理课必须学习的专业内容,它揭示了雷达探测目标的能力与内部及外部各种因素之间的关系,并可作为系统设计的工具。

书中还包括了雷达的基本理论,诸如最佳线性处理的匹配滤波器、分辨理论、雷达模糊函数、雷达测量精度等,这些内容分别纳入了相关的章节。

关于雷达的目标识别能力、严酷工作环境下对军用雷达中的反干扰要求(它推动着军用雷达系统的重大改进)在本书中也有涉及。

本书作为教材使用时,当注重于基本原理和基本理论。书中各章节具有相对的独立性,可根据本科生、硕士研究生的不同要求选择相关内容。书中有些内容(主要是理论证明、公式推导以及扩展的内容)均用小号楷体字印刷并以*标注以示区别。

本书改编由丁鹭飞(第 1 章、第 5 章、第 6 章、第 8 章、第 9 章)、耿富录(第 2 章、第 3 章、第 7 章)、陈建春(第 4 章并参与第 8 章、第 9 章)三位教授共同完成。

由于作者水平有限,书中难免存在一些缺点甚至错误,殷切希望广大读者批评、指正。

目 录

第1章 绪论	1	2.4 真空管雷达发射机	44
1.1 雷达的任务	1	2.4.1 概述	44
1.1.1 雷达回波中的可用信息	1	2.4.2 真空微波管的选择	44
1.1.2 雷达探测能力——基本雷达方程	4	2.4.3 线性注管(O型管)	45
1.2 雷达的基本组成	5	2.4.4 正交场微波管(M型管)	48
1.3 雷达的工作频率	7	2.4.5 真空微波管的性能比较和展望	50
1.4 雷达的应用和发展	8	2.4.6 几种典型的真空管发射机	51
1.4.1 应用情况	8	2.4.7 微波功率模块(MPM)及空间功率合成方法	54
1.4.2 雷达的发展	10	2.5 固态雷达发射机	55
*1.4.3 目标识别	12	2.5.1 概述	55
*1.5 电子战与军用雷达的发展	15	2.5.2 微波晶体管及其发展概况	55
1.5.1 电子战的科学定义	15	2.5.3 固态发射机的分类和特点	57
1.5.2 雷达反干扰	16	2.5.4 几种典型的全固态雷达发射机	58
1.5.3 隐身和反隐身的斗争	20	2.5.5 有源相控阵雷达全固态发射机及其特点	61
1.5.4 反侦察和反摧毁	24	2.5.6 有源相控阵雷达的T/R组件	62
参考文献	24	2.5.7 有源相控阵雷达全固态发射机	64
第2章 雷达发射机	26	2.6 脉冲调制器	66
2.1 概述	26	2.6.1 概述	66
2.1.1 雷达发射机的任务和功能	26	2.6.2 线型脉冲(软性开关)调制器	67
2.1.2 单级振荡发射机和主振放大式发射机	26	2.6.3 刚性开关脉冲调制器	72
2.1.3 现代雷达对发射机的主要要求	28	2.6.4 浮动板调制器	73
2.2 雷达发射机的主要质量指标	30	2.6.5 脉冲调制器的性能比较	77
2.2.1 工作频率和瞬时带宽	30	参考文献	78
2.2.2 输出功率	30	第3章 雷达接收机	79
2.2.3 信号形式和脉冲波形	31	3.1 雷达接收机的基本原理和组成	79
2.2.4 信号的稳定度和频谱纯度	33	3.1.1 概述	79
2.2.5 发射机的效率	37	3.1.2 雷达接收机的基本原理	79
2.3 雷达发射机的主要部件和各种应用	37	3.1.3 雷达接收机的基本组成	82
2.3.1 概述	37	3.2 雷达接收机的主要质量指标	85
2.3.2 发射机的主要部件	37	3.2.1 灵敏度和噪声系数	85
2.3.3 几种典型的雷达发射机	39	3.2.2 接收机的工作频带宽度和滤波特性	85
2.3.4 全固态雷达发射机	41		
2.3.5 国内外典型雷达发射机概况	42		

3.2.3	动态范围和增益	86	3.9	频率源及其应用	132
3.2.4	频率源的频率稳定性和 频谱纯度	86	3.9.1	概述	132
3.2.5	幅度和相位的稳定性	86	3.9.2	直接频率合成器和间接频率 合成器	132
3.2.6	正交鉴相器的正交度	86	3.9.3	直接数字频率合成器及其 应用	135
3.2.7	A/D 变换器的技术参数	87	3.10	波形产生方法及其应用	138
3.2.8	抗干扰能力	87	3.10.1	概述	138
3.2.9	频率源和发射激励性能	87	3.10.2	信号波形的模拟产生方法	139
3.2.10	微电子化、模块化和系 列化	88	3.10.3	信号波形的数字产生方法	144
3.3	常规雷达接收机和现代雷达 接收机	88	3.10.4	宽带和超宽带信号的产生 方法	146
3.3.1	雷达接收机的分类	88	3.11	数字雷达接收机	152
3.3.2	常规雷达接收机	88	3.11.1	数字雷达接收机的组成	152
3.3.3	现代雷达接收机	90	3.11.2	带通信号采样	153
3.4	接收机的噪声系数和灵敏度	95	3.11.3	数字正交鉴相(数字下 变频)	154
3.4.1	接收机的噪声	95	3.11.4	S 波段射频数字接收机	156
3.4.2	噪声系数和噪声温度	98	3.11.5	数字雷达系统	157
3.4.3	级联电路的噪声系数	101	3.12	数字阵列雷达接收机	158
3.4.4	接收机灵敏度	102	3.12.1	概述	158
3.5	接收机的高频部分	104	3.12.2	数字阵列雷达的组成和 基本原理	158
3.5.1	概述	104	3.12.3	数字 T/R 模块	159
3.5.2	高频低噪声放大器的种类和 特点	105	3.12.4	数字波束形成	160
*3.5.3	混频器的变频特性及其 分类	106	3.12.5	大容量高速数据传输技术	161
3.6	接收机的动态范围和增益控制	109	3.12.6	基本 DAR 的概念结构和 原理	162
3.6.1	动态范围	109	3.12.7	光纤(FO)上/下链高速 数据传输	163
3.6.2	接收机的增益控制	111	3.13	软件无线电在雷达接收机中的 应用	164
3.6.3	对数放大器	115	3.13.1	软件无线电的基本 结构	164
3.7	自动频率控制	117	*3.13.2	软件雷达发射机和接 收机	165
3.7.1	概述	117	参考文献	167	
3.7.2	自动频率控制(AFC)的 原理	118	第4章	雷达终端	168
*3.7.3	AFC 的几种应用	120	4.1	概述	168
3.8	滤波和接收机的带宽	123	4.2	传统雷达显示器的类型及质量指标	169
3.8.1	匹配滤波器基本概念	123	4.2.1	主要类型	169
3.8.2	匹配滤波器的频率响应 函数	124	4.2.2	雷达显示器的质量指标	171
3.8.3	匹配滤波器的脉冲响应 函数	127	4.3	距离显示器	171
3.8.4	相关接收机及其应用	127	4.3.1	A 型显示器	171
3.8.5	准匹配滤波器	128			
3.8.6	接收机带宽的选择	130			

4.3.2	A/R 型显示器	173	5.3.1	积累的效果	230
4.4	平面位置显示器	175	5.3.2	积累脉冲数的确定	232
4.4.1	概述	175	5.4	目标截面积及其起伏特性	233
4.4.2	动圈式 PPI	176	5.4.1	点目标特性与波长的关系	233
4.4.3	定圈式 PPI	177	5.4.2	简单形状目标的雷达截面积	234
4.5	数字式雷达显示技术	179	5.4.3	目标特性与极化的关系	235
4.5.1	概述	179	5.4.4	复杂目标的雷达截面积	237
4.5.2	计算机及智能图形显示	179	5.4.5	目标起伏模型	240
4.5.3	字符产生器	180	5.5	系统损耗	244
4.5.4	矢量产生器	183	5.5.1	射频传输损耗	245
4.5.5	数字式扫描变换	188	5.5.2	天线波束形状损失	245
4.5.6	雷达图像的展开	190	5.5.3	叠加损失 (collapsing loss)	245
4.5.7	视频处理器	193	5.5.4	设备不完善的损失	246
4.6	随机扫描雷达显示系统	195	5.5.5	其他损失	247
4.6.1	概述	195	5.6	传播过程中各种因素的影响	247
4.6.2	随机扫描原理及显示系统构成	195	5.6.1	大气传播影响	248
4.6.3	随机扫描雷达显示系统举例——形势显示器	196	5.6.2	地面或水面反射对作用距离的影响	252
4.7	光栅扫描雷达显示系统	198	5.7	雷达方程的几种形式	255
4.7.1	概述	198	5.7.1	二次雷达方程	255
4.7.2	光栅显示原理及主要质量指标	199	5.7.2	双基地雷达方程	256
4.7.3	CRT 光栅扫描显示系统构成	200	5.7.3	用信号能量表示的雷达方程	257
4.7.4	LCD 光栅扫描显示系统的构成	202	5.7.4	搜索雷达方程	258
4.7.5	光栅扫描雷达显示系统	204	5.7.5	跟踪雷达方程	259
4.8	雷达点迹录取和数据处理	207	5.7.6	干扰环境下的雷达方程	259
4.8.1	概述	207	参考文献	263	
4.8.2	目标距离数据的录取	209	第 6 章 目标距离的测量	264	
4.8.3	目标角坐标数据的录取	210	6.1	脉冲法测距	264
4.8.4	天线轴角数据的录取	211	6.1.1	基本原理	264
4.8.5	数据处理	217	6.1.2	影响测距精度的因素	265
参考文献	218	6.1.3	测距的理论精度 (极限精度)	267	
第 5 章 雷达作用距离	219	6.1.4	距离分辨力和测距范围	270	
5.1	雷达方程	219	6.1.5	判测距模糊的方法	271
5.1.1	基本雷达方程	219	6.2	调频法测距	273
5.1.2	目标的雷达截面积 (RCS)	221	6.2.1	调频连续波测距	273
5.2	最小可检测信号	222	6.2.2	脉冲调频测距	279
5.2.1	最小可检测信噪比	222	6.3	距离跟踪原理	280
5.2.2	门限检测	224	6.3.1	人工距离跟踪	281
5.2.3	检测性能和信噪比	225	6.3.2	自动距离跟踪	283
5.3	脉冲积累对检测性能的改善	230	6.4	数字式自动测距器	287
			6.4.1	数字式测距的基本原理	287
			6.4.2	数字式自动跟踪	288
			6.4.3	自动搜索和截获	291
			参考文献	293	

第7章 角度测量	294	7.7.4 相位和差单脉冲雷达	373
7.1 概述	294	*7.7.5 圆锥扫描系统与单脉冲	
7.2 测角方法及其比较	295	系统的比较	374
7.2.1 相位法测角	295	7.7.6 影响测角精度的诸因素	375
7.2.2 振幅法测角	299	*7.7.7 对角跟踪误差的综合讨论	381
7.3 天线波束的扫描方法	303	参考文献	382
7.3.1 波束形状和扫描方法	303	第8章 运动目标检测	383
7.3.2 天线波束的扫描方法	305	8.1 多普勒效应及其在雷达中的应用	383
7.3.3 相位扫描法	306	8.1.1 多普勒效应	383
7.3.4 频率扫描	312	8.1.2 多普勒信息的提取	386
7.4 相控阵雷达	315	8.1.3 盲速和频闪	389
7.4.1 概述	315	8.2 动目标显示雷达的工作原理及	
7.4.2 相控阵天线和相控阵雷达		主要组成	393
的特点	316	8.2.1 基本工作原理	393
7.4.3 平面相控阵天线	318	8.2.2 获得相参振荡电压的方法	393
7.4.4 相控阵雷达的馈电和馈		8.2.3 消除固定目标回波	396
相方式	320	8.3 盲速、盲相的影响及其解决途径	399
7.4.5 平面相控阵天线馈电网络及其		8.3.1 盲速	399
波束控制数码	325	8.3.2 盲相	402
7.4.6 移相器	328	8.4 回波和杂波的频谱及动目标显示	
7.4.7 T/R 组件的组成与主要功能	331	滤波器	406
7.4.8 有源相控阵雷达发展概况		8.4.1 目标回波和杂波的频谱特性	406
与应用	333	8.4.2 动目标显示滤波器	410
7.5 数字阵列雷达	337	8.4.3 MTI 的数字实现技术	415
7.5.1 概述	337	8.5 动目标显示雷达的工作质量及质量	
7.5.2 数字阵列雷达的组成和工作		指标	417
原理	337	8.5.1 质量指标	417
7.5.3 数字 T/R 组件的组成和		8.5.2 影响系统工作质量的因素	418
特点	339	8.6 动目标检测(MTD)	424
7.5.4 数字波束形成 DBF 的原理	340	8.6.1 限幅的影响和线性 MTI	425
7.5.5 接收数字波束形成	343	8.6.2 多普勒滤波器组	428
7.5.6 发射数字波束形成	345	8.6.3 目标检测(MTD)处理器	
7.5.7 基本数字阵列雷达	347	举例	430
7.6 三坐标雷达	348	8.7 自适应动目标显示系统	433
7.6.1 概述	348	8.7.1 自适应速度补偿	433
7.6.2 三坐标雷达的数据率	349	8.7.2 自适应最佳滤波	436
7.6.3 单波束三坐标雷达	350	8.8 脉冲多普勒雷达	444
7.6.4 多波束三坐标雷达	352	8.8.1 脉冲多普勒雷达的特点及其	
7.6.5 多波束形成技术	355	应用	444
7.6.6 仰角测量范围和高度测量	361	8.8.2 机载下视雷达的杂波谱	447
7.7 自动测角的原理和测角精度	362	8.8.3 典型脉冲多普勒雷达的组成	
7.7.1 概述	362	和原理	450
7.7.2 圆锥扫描自动测角系统	363	8.8.4 脉冲重复频率的选择	455
7.7.3 振幅和差单脉冲雷达	366	8.9 速度测量	458

8.9.1	连续波雷达测速	458	9.2.2	编码信号及其匹配滤波器 ...	512
8.9.2	脉冲雷达测速	461	9.2.3	时间-频率码波形	516
*8.9.3	四维分辨	463	9.3	合成孔径雷达(SAR)	519
*附录	相关型杂波回波的计算机仿真	465	9.3.1	引言	519
	参考文献	469	9.3.2	SAR 的基本工作原理	521
第9章	高分辨力雷达	470	9.3.3	SAR 的参数	529
9.1	雷达分辨力	470	9.3.4	SAR 的信号处理	533
9.1.1	距离和速度分辨力	471	9.4	逆合成孔径雷达(ISAR)	536
9.1.2	模糊函数及其性质	477	9.4.1	引言	536
9.1.3	几种典型信号的模糊函数 ...	482	9.4.2	转台目标成像	537
9.2	高距离分辨力信号及处理	488	*9.4.3	运动目标的平动补偿	539
9.2.1	线性调频脉冲压缩信号的匹配 滤波器	490	*9.5	阵列天线的角度高分辨力	541
				参考文献	546

第1章 绪论

1.1 雷达的任务

雷达是英文 Radar 的音译，源于 Radio Detection and Ranging 的缩写，原意是“无线电探测和测距”，即用无线电方法发现目标并测定它们在空间的位置，因此雷达也称为“无线电定位”。随着雷达技术的发展，雷达的任务不仅是测量目标的距离、方位和仰角，而且还包括测量目标的速度，以及从目标回波中获取更多有关目标的信息。

雷达是利用目标对电磁波的反射（或称为二次散射）现象来发现目标并测定其位置的。飞机、导弹、人造卫星、各种舰艇、车辆、兵器、炮弹及建筑物、山川、云雨等，都可能作为雷达的探测目标，这要根据雷达的用途而定。

1.1.1 雷达回波中的可用信息

当雷达探测到目标后，就要从目标回波中提取有关信息：当目标尺寸小于雷达分辨单元时，则可将目标视为“点”目标，这时可对目标的距离和空间角度定位，目标位置的变化率可由其距离和角度随时间变化的规律中得到，并由此建立对目标的跟踪；雷达的测量如果能在—维或多维上有足够的分辨力，这时的目标不是一个“点”，而可视为由多个散射点组成的复杂目标，从而可得到目标尺寸和形状的信息；采用不同的极化，可测量目标形状的对称性。从原理上讲，雷达还可测定目标的表面粗糙度及介电特性等。

目标在空间、陆地或海面上的位置可以用多种坐标系来表示。最常见的是直角坐标系，即空间任一点目标 P 的位置可用 x 、 y 、 z 三个坐标值来决定。在雷达应用中，测定目标坐标常采用极（球）坐标系统，如图 1.1 所示。图中，空间任一目标 P 所在位置可用下列三个坐标值确定：

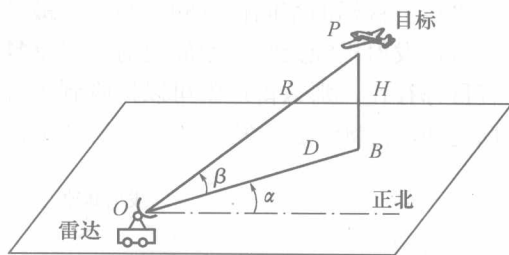


图 1.1 用极（球）坐标系统表示目标位置

(1) 目标的斜距 R ：雷达到目标的直线距离 OP 。

(2) 方位角 α ：目标斜距 R 在水平面上的投影 OB 与某一起始方向（正北、正南或其他参考方向）在水平面上的夹角。

(3) 仰角 β ：斜距 R 与它在水平面上的投影 OB 在铅垂面上的夹角，有时也称为倾角或高低角。

如果需要知道目标的高度和水平距离，那么利用圆柱坐标系统比较方便。在这种系统中，目标的位置由以下三个坐标值来确定：水平距离 D ，方位角 α ，高度 H 。

这两种坐标系统之间的关系如下：

$$D = R \cos \beta, H = R \sin \beta, \alpha = \alpha$$

上述这些关系仅在目标的距离不太远时是正确的。当距离较远时，由于地面的弯曲，必须进行适当的修改。

现以典型的单基地脉冲雷达为例来说明雷达测量的基本工作原理，图 1.2 示出了这种雷达的简化框图。

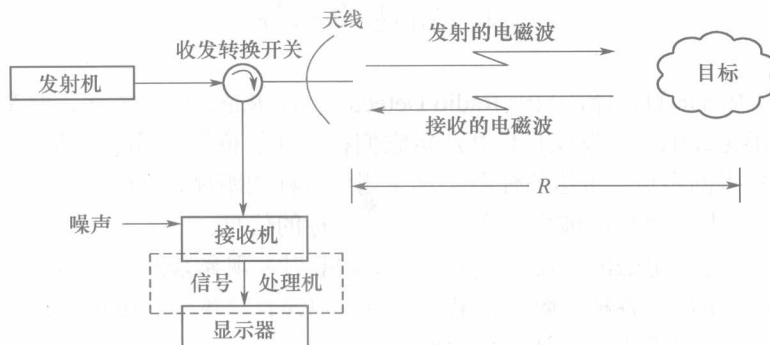


图 1.2 雷达的原理及其基本组成

由雷达发射机产生的电磁能经收发开关后传输给天线，再由天线将此电磁能定向辐射于大气中。电磁能在大气中以光速（约 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）传播，如果目标恰好位于定向天线的波束内，则它将要截取一部分电磁能。目标将被截取的电磁能向各方向散射，其中部分散射的能量朝向雷达接收方向。雷达天线收集到这部分散射的电磁波后，经传输线和收发开关馈给接收机。接收机将该微弱信号放大并经信号处理后即可获取所需信息，并将结果送至终端显示。

1. 目标斜距的测量

“点”目标的空间位置测量是雷达最基本的测量，它包括距离、角度和径向速度。雷达工作时，发射机经天线向空间发射一串重复周期一定的高频脉冲。如果在电磁波传播的途径上有目标存在，那么雷达就可以接收到由目标反射回来的回波。由于回波信号往返于雷达与目标之间，它将滞后于发射脉冲一个时间 t_r ，如图 1.3 所示。我们知道电磁波的能量是以光速

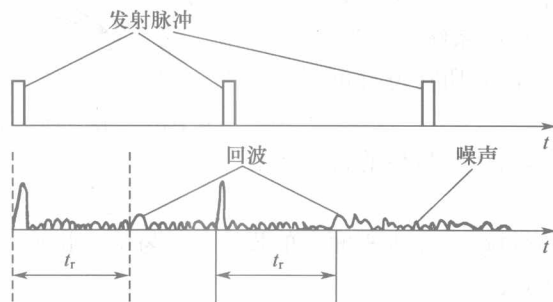


图 1.3 雷达测距

传播的，设目标的距离为 R ，则传播的距离等于光速乘以时间间隔，即

$$2R = ct_r$$

或

$$R = \frac{ct_r}{2}$$

式中, R 为目标到雷达站的单程距离, 单位为 m ; t_r 为电磁波往返于目标与雷达之间的时间间隔, 单位为 s ; c 为光速, $c=3 \times 10^8 m/s$ 。

由于电磁波传播的速度很快, 雷达技术常用的时间单位为 μs , 回波脉冲滞后于发射脉冲为一个微秒时, 对应的目标斜距 R 为

$$R = \frac{c}{2} t_r = 150m = 0.15km$$

能在远距和近距离测量目标距离是雷达的一个突出优点, 而且受气候条件的影响较小, 这是优于其他传感器的。测距的精度和分辨力与发射信号带宽 (或处理后的脉冲宽度) 有关, 脉冲越窄, 性能越好。目前远程空中监视雷达距离测量精度可达数十米量级, 而精密系统的精度则可达亚米级。

2. 目标角位置的测量

目标角位置指方位角或仰角, 在雷达技术中测量这两个角位置基本上都是利用天线的方向性来实现的。雷达天线将电磁能量汇集在窄波束内, 当天线波束轴对准目标时, 回波信号最强, 如图 1.4 中实线所示。当目标偏离天线波束轴时回波信号减弱, 如图 1.4 中虚线所示。根据接收回波最强时的天线波束指向, 就可确定目标的方向, 这就是角坐标测量的基本原理。天线波束指向实际上也是辐射波的波前方向。

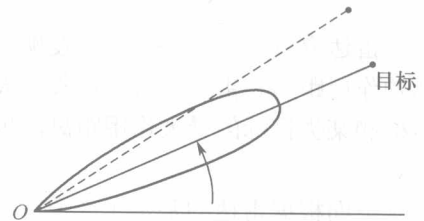


图 1.4 角坐标测量

为了提高角度测量的精度, 还会有一些改进的测量方法 (详见后述)。天线尺寸增加, 波束变窄, 测角精度和角分辨力会提高。测角精度远比天线波束宽度

窄。典型情况下, 测角精度可达约 $\frac{1}{10}$ 波束宽度, 而用于靶场测量的单脉冲雷达测角精度可达 0.1 毫弧度均方根 (0.006°)'。

回波的波前方向 (角位置) 还可以用测量两个分离接收天线收到信号的相位差来决定。

3. 相对速度的测量

有些雷达除确定目标的位置外, 还需测定运动目标的相对速度, 例如测量飞机或导弹飞行时的速度。当目标与雷达站之间存在相对速度时, 接收到回波信号的载频相对于发射信号的载频产生一个频移, 这个频移在物理学上称为多普勒频移, 它的数值为

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$$

式中, f_d 为多普勒频移, 单位为 Hz ; v_r 为雷达与目标之间的径向速度, 单位为 m/s ; λ 为载波波长, 单位为 m 。

当目标向着雷达站运动时, $v_r > 0$, 回波载频提高; 反之 $v_r < 0$, 回波载频降低。雷达只要能够测量出回波信号的多普勒频移 f_d , 就可以确定目标与雷达站之间的相对速度。

径向速度也可以用距离的变化率求得, 此时精度不高但不会产生模糊。无论是用距离变

化率或用多普勒频移来测量速度，都需要时间。观测时间越长，则速度测量精度越高。

多普勒频移除用做测速外，更广泛的是应用于动目标显示（MTI）、脉冲多普勒（PD）等雷达中，以区分运动目标回波和杂波。

4. 目标尺寸和形状

如果雷达测量具有足够高的分辨力，目标可视为具有多个散射点的复杂目标时就可以提供目标尺寸的测量。由于许多目标的尺寸在数十米量级，因而分辨能力应为数米或更小。用足够宽的信号频谱宽度，目前雷达的分辨力在距离维已能达到，但在通常作用距离下切向距离（RQ）维的分辨力还远远达不到，增加天线的实际孔径来解决此问题是不现实的。然而当雷达和目标的各个部分有相对运动时，就可以利用多普勒频率域的分辨力来获得切向距离维的分辨力。例如，装于飞机和宇宙飞船上的 SAR（综合孔径）雷达，与目标的相对运动是由雷达的运动产生的。高分辨力雷达可以获得目标在距离和切向距离方向的轮廓（雷达成像）。

此外，比较目标对不同极化波（如正交极化等）的散射场，就可以提供目标形状不对称性的量度。复杂目标的回波振幅会随时间变化。例如，螺旋桨的转动和喷气发动机的转动将使回波振幅的调制各具特点，可经过谱分析检测到。这些信息为目标识别提供了相应的基础。

1.1.2 雷达探测能力——基本雷达方程

雷达究竟能在多远的距离发现（检测到）目标，这要由雷达方程来回答。雷达方程将雷达的作用距离和雷达发射、接收、天线和环境等因素联系起来，因此它不仅可以用来决定雷达检测某类目标的最大作用距离，也可以作为了解雷达的工作关系和用做设计雷达的一种工具。

下面根据雷达的基本工作原理来推导自由空间的雷达方程。

设雷达发射机功率为 P_t ，当用各向均匀辐射的天线发射时，距雷达 R 远处任一点的功率密度 S'_1 等于功率被假想的球面积 $4\pi R^2$ 所除，即

$$S'_1 = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

实际雷达总是使用定向天线将发射机功率集中辐射于某些方向上。天线增益 G 用来表示相对于各向同性天线，实际天线在辐射方向上功率增加的倍数。因此当发射天线增益为 G 时，距雷达 R 处目标所照射到的功率密度为

$$S_1 = \frac{P_t G}{4\pi R^2}$$

目标截获了一部分照射功率并将它们重新辐射于不同的方向。用雷达截面积 σ 来表示被目标截获照射功率后再次辐射回雷达处功率的大小，或用下式表示在雷达处的回波信号功率密度：

$$S_2 = S_1 \frac{\sigma}{4\pi R^2} = \frac{P_t G}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2}$$

σ 的大小随具体目标而异，它可以表示目标被雷达“看见”的尺寸。雷达接收天线只收集了回波功率的一部分，设天线的有效接收面积为 A_e ，则雷达收到的回波功率 P_r 为

$$P_r = A_e S_2 = \frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 R^4}$$

当接收到的回波功率 P_r 等于最小可检测信号 S_{\min} 时, 雷达达到其最大作用距离 R_{\max} , 超过这个距离后, 就不能有效地检测到目标:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G A_e \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

通常收发共用天线, 天线增益 G 和它的有效接收面积 A_e 具有以下关系:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2}$$

因此基本方程又可写成以下形式:

$$R_{\max} = \left[\frac{R_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{1/4} = \left[\frac{P_t A_e^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 S_{\min}} \right]^{1/4}$$

上述基本雷达方程可以正确地反映雷达各参数对其检测能力影响的程度, 但并不能充分反映实际雷达的性能, 这是因为许多影响作用距离的环境和实际因素在方程中没有被包括。关于雷达作用距离的深入讨论将在第 5 章展开。

1.2 雷达的基本组成

以典型单基地脉冲雷达为例来说明雷达的基本组成及其作用。如图 1.5 所示, 它主要由天线、发射机、接收机、信号处理机和终端设备等组成。雷达发射机产生辐射所需强度的脉冲功率, 其波形是脉冲宽度为 τ 而重复周期为 T_r 的高频脉冲串。发射机现有两种类型: 一种是直接振荡式(如磁控管振荡器), 它在脉冲调制器控制下产生的高频脉冲功率被直接馈送到天线; 另一种是功率放大式(主振放大式), 它是由高稳定度的频率源(频率综合器)作为频率基准, 在低功率电平上形成所需波形的高频脉冲串作为激励信号, 在发射机中予以放大并驱动末级功放而获得大的脉冲功率来馈给天线的。功率放大式发射机的优点是频率稳定度高且每次辐射是相参的, 这便于对回波信号进行相参处理, 同时也可以产生各种所需的复杂脉冲波形。

发射机输出的功率馈送到天线, 而后经天线辐射到空间。

脉冲雷达天线一般具有很强的方向性, 以便集中辐射能量来获得较大的观测距离。同时, 天线的方向性越强, 天线波瓣宽度越窄, 雷达测向的精度和分辨力就越高。常用的微波雷达天线是抛物面反射体, 馈源放置在焦点上, 天线反射体将高频能量聚成窄波束。天线波束在空间的扫描常采用机械转动天线来得到, 由天线控制系统来控制天线在空间的扫描, 控制系统同时将天线的转动数据送到终端设备, 以便取得天线指向的角度数据。根据雷达用途的不同, 波束形状可以是扇形波束, 也可以是针状波束。天线波束的空间扫描也可以采用电子控制的办法, 它比机械扫描的速度快, 灵活性好, 这就是 20 世纪末开始日益广泛使用的平面相控阵天线和电子扫描的阵列天线。前者在方位和仰角两个角度上均实行电扫描; 后者是一维电扫, 另一维为机械扫描。

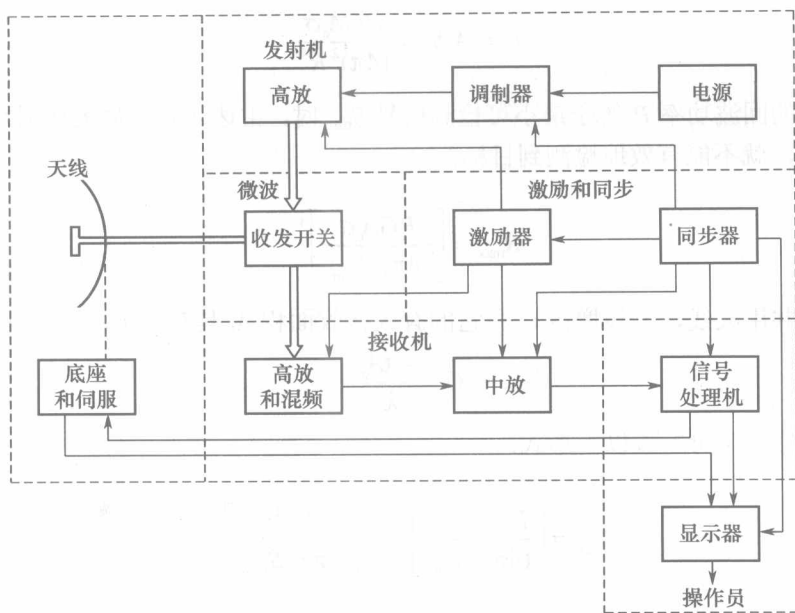


图 1.5 脉冲雷达基本组成框图

脉冲雷达的天线是收发共用的，这需要高速开关装置，在发射时，天线与发射机接通，并与接收机断开，以免强大的发射功率进入接收机把接收机高放混频部分烧毁；接收时，天线与接收机接通，并与发射机断开，以免微弱的接收功率因发射机旁路而减弱。这种装置称为天线收发开关。天线收发开关属于高频馈线中的一部分，通常由高频传输线和放电管组成，或用环行器及隔离器等来实现。

接收机多为超外差式，由高频放大（有些雷达接收机不用高频放大）、混频、中频放大、检波、视频放大等电路组成。接收机的首要任务是把微弱的回波信号放大到足以进行信号处理的电平，同时接收机内部的噪声应尽量小，以保证接收机的高灵敏度，因此接收机的第一级常采用低噪声高频放大器。一般在接收机中也进行一部分信号处理。例如，中频放大器的频率特性应设计为发射信号的匹配滤波器，这样就能在中放输出端获得最大的峰值信号噪声功率比。对于需要进行较复杂信号处理的雷达，如需分辨固定杂波和运动目标回波而将杂波滤去的雷达，则可以由典型接收机后接的信号处理机完成。

接收机中的检波器通常是包络检波器，它取出调制包络并送到视频放大器，如果后面要进行多普勒处理，则可用相位检波器替代包络检波器。

信号处理的目的是消除不需要的信号（如杂波）及干扰而通过或加强由目标产生的回波信号。信号处理是在做出检测判决之前完成的，它通常包括动目标显示（MTI）和脉冲多普勒雷达中的多普勒滤波器，有时也包括复杂信号的脉冲压缩处理。

许多现代雷达在检测判决之后要进行数据处理。主要的数据处理例子是自动跟踪，而目标识别是另一个例子。性能好的雷达在信号处理中消去了不需要的杂波和干扰，而自动跟踪只需处理检测到的目标回波，输入端如有杂波剩余，可采用恒虚警（CFAR）等技术加以补救。

通常情况下，接收机中放输出后经检波器取出脉冲调制波形，由视频放大器放大后送到终端设备。最简单的终端是显示器。例如，在平面位置显示器（PPI）上可根据目标亮弧的位置，测读目标的距离和方位角这两个坐标（详见第 4 章）。

显示器除了可以直接显示由雷达接收机输出的原始视频外，还可以显示经过处理的信息。例如，由自动检测和跟踪设备（ADT）先将收到的原始视频信号（接收机或信号处理机输出）按距离方位分辨单元分别积累，而后经门限检测，取出较强的回波信号而消去大部分噪声，对门限检测后的每个目标建立航迹跟踪，最后，按照需要，将经过上述处理的回波信息加到终端显示器。自动检测和跟踪设备的各种功能常要依靠数字计算机来完成。

同步设备（频率综合器）是雷达机的频率和时间标准。它产生的各种频率振荡之间保持严格的相位关系，从而保证雷达全相参工作。时间标准提供统一的时钟，使雷达各分机保持同步工作。

图 1.5 所示的雷达组成框图是基本框图，不同类型的雷达还有一些补充和差别，这些问题将在以后章节中讨论。

1.3 雷达的工作频率

按照雷达的工作原理，不论发射波的频率如何，只要是通过辐射电磁能量和利用从目标反射回来的回波而对目标探测和定位，都属于雷达系统工作的范畴。常用的雷达工作频率范围为 220~35 000MHz（220MHz~35GHz），实际上各类雷达工作的频率在两头都超出了上述范围。例如，天波超视距（OTH）雷达的工作频率为 4MHz 或 5MHz，而地波超视距的工作频率则低到 2MHz。在频谱的另一端，毫米波雷达可以工作到 94GHz 以上，实验毫米波雷达的工作频率超过 240GHz，激光（Laser）雷达工作于更高的频率。工作频率不同的雷达在工程实现时差别很大。

雷达的工作频率和整个电磁波频谱示于图 1.6，实际上绝大部分雷达工作于 200~10 000 MHz 频段。由于 20 世纪 70 年代已制成能产生毫米波的大功率管，毫米波雷达已获得试制和应用。

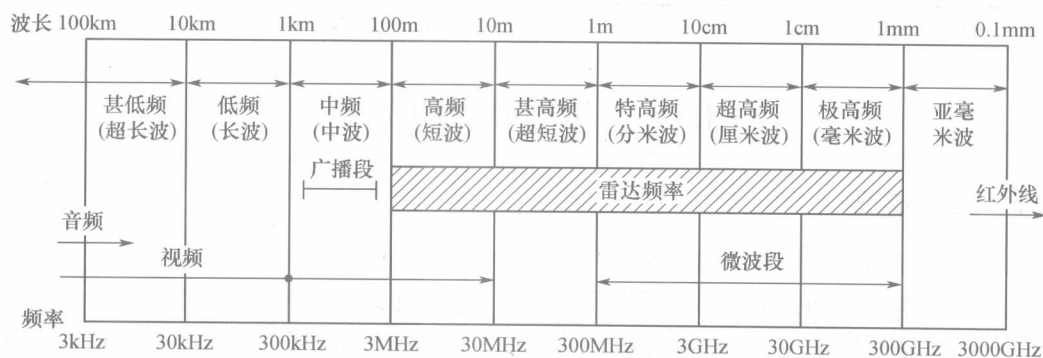


图 1.6 雷达频率和电磁波频谱

目前在雷达技术领域里的常用频段，用 L、S、C、X 等英文字母来命名。这是在第二次世界大战中一些国家为了保密而采用的，以后就一直沿用下来，我国也经常采用。表 1.1 列出了雷达频段和频率的对应关系。表中的频段有时以波长来表示，如 L 波段代表以 22cm 为中心的 20~25cm（S 代表 10cm 为中心，相应地，C 代表 5cm、X 代表 3cm、Ku 代表 2.2cm、Ka 代表 8mm 等为中心）。表中还列出国际电信联盟分配给雷达的具体波段。例如，L 波段包括的频率范围应是 1000~2000MHz，而 L 波段雷达的工作频率却被约束在 1215~1400MHz