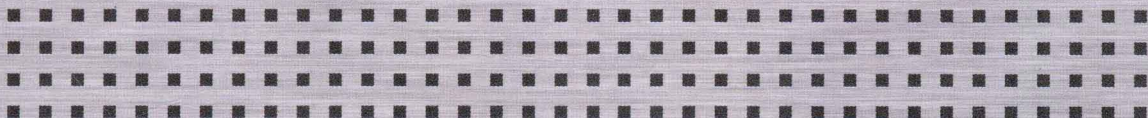


信息技术重点图书·雷达

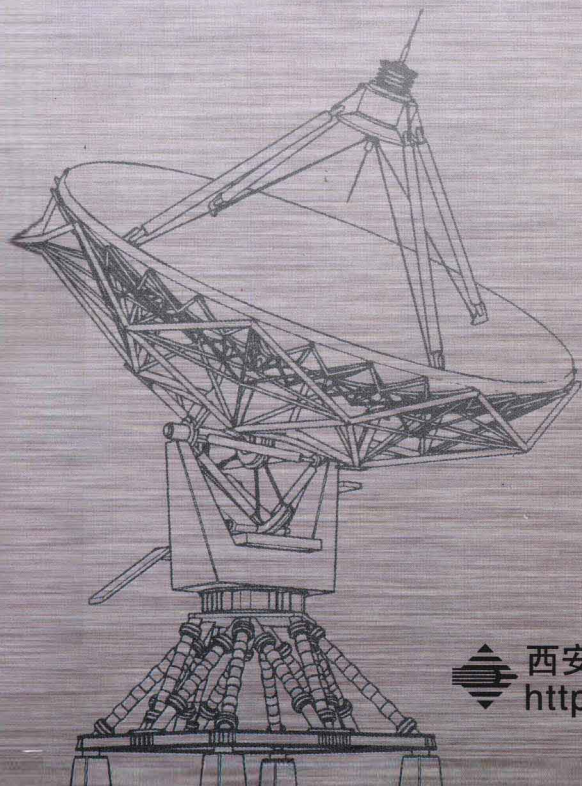


*Modern Radar System
Analysis and Design*

现代雷达系统 分析与设计



陈伯孝 等编著 ◆



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

信息技术重点图书·雷达

现代雷达系统分析与设计

Modern Radar System Analysis and Design

陈伯孝 等编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述了现代雷达系统分析与设计的全过程,涵盖雷达原理与雷达系统两部分内容。全书共 12 章。书中以雷达系统为主线,主要介绍雷达信号设计、雷达常用的信号处理方法,以及杂波抑制、干扰抑制方法,还介绍了从雷达信号检测到参数测量与跟踪等方面的基本理论和实践技能与关键技术,并提供了一些非常经典的 MATLAB 程序,以便于读者理解和实践应用。最后给出了几个典型的雷达系统设计案例。

本书内容新颖,系统性强,理论联系实际,突出工程实践和应用,既可以作为高等学校电子工程相关专业研究生和高年级本科生的雷达课程教材或参考书,又可以帮助雷达工程技术人员掌握雷达系统的分析和设计方法,分析并解决有关实际问题。

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达系统分析与设计/陈伯孝等编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2012.9

信息技术重点图书·雷达

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2907 - 0

I. ① 现… II. ① 陈… III. ① 雷达—系统分析—高等学校—教材 ② 雷达—系统设计—高等学校—教材 IV. ① TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 183745 号

策 划 李惠萍

责任编辑 李惠萍

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2012 年 9 月第 1 版 2012 年 9 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 32

字 数 760 千字

印 数 1~3000 册

定 价 55.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2907 - 0/TN · 0670

XDUP 3199001 - 1

*** 如有印装问题可调换 ***

序 言

雷达探测作为一种可自主地、全天时、全天候获取远距离目标信息的探测手段，在第二次世界大战中开始被普遍采用，战后又得到了持续发展。近年来，由于计算机、微电子、新材料、新生产工艺等雷达相关技术的进步，在军事需求推动下，雷达技术发展非常迅速。随着雷达测量的目标种类及目标参数的增加，以及测量距离、测量精细程度的显著提高，雷达在国民经济中的应用也不断增加，其应用潜力也引起多方关注。这是学习雷达技术，从事雷达与雷达相关技术研制、生产与推广应用的需求日益增多的根本原因。本书的出版将有利于满足这一需求。

雷达技术的进步反映在许多方面，作为雷达基本构成的发射机、接收机、天线、信号处理、终端显示及雷达信息传递等都有了很大变化，其中，计算机技术、固态功率放大器件、超大规模集成电路对相控阵天线技术的应用与发展带来的影响尤为显著。雷达探测距离已可达 10^4 千米以上；通过采用宽带信号与大孔径天线，雷达已可实现很高的距离和角度分辨率，并使雷达目标识别技术获得了明显进步；利用合成孔径与逆合成孔径技术，雷达已实现了高分辨成像；在宽带技术与多波段技术的发展基础上，雷达还可实现通信、导航、电子对抗与反对抗等功能。复杂信号设计与信号处理技术的进步使雷达具备了越来越多的自适应功能。单部雷达探测发展为多部雷达组网探测，双基地与多基地雷达、无源探测雷达也获得了较快发展。通信技术中的多输入多输出(MIMO)概念与相控阵天线结合，推动了多输入多输出相控阵雷达(MIMO PAR)技术的发展。各种新的雷达平台，如各种机载、空间载雷达(SBR)平台的出现与有效应用，也充分反映了雷达技术的进步。

雷达技术的快速进步与现代战争对雷达的作战需求密切相关。信息化作战首先要求快速的信息获取，因而对雷达提出了许多新要求。例如，需要观察不断出现的新目标、新作战平台，需要观测隐身目标及低雷达反射面积目标与低空目标，需要推远雷达观测距离，扩大信息获取范围，对某些战略目标进行长期动态监视，连续获取有关信息，需要获取更多、更精确的目标信息，以便对观测目标进行成像、识别与解译。此外，雷达还应能被集成进入新的武器平台或系统，以开发新型武器平台并提高其信息化水平与作战性能。特别重要的是，在现代战争中，雷达要能适应复杂的目标环境与工作环境，具有较高的抗干扰与杂波抑制能力，在恶劣环境中维持基本的探测性能，并需要甄别并拒绝

上报敌方人为制造的虚假目标信息。

要满足上述需求，继续快速推动雷达技术的发展，需要在不同层面上进行创新。掌握雷达系统的有关基本理论，培养创新人才尤为重要。本书的出版将有利于此。本书作者根据多年来在雷达与雷达相关领域从事教学与科研工作的经验，系统地讲述了现代雷达系统分析与设计的全过程，在简单介绍雷达基本构成中的发射机、接收机、天线、信息处理与终端设备的基本原理与性能后，重点介绍雷达信号设计与信号处理、杂波与干扰抑制等；对雷达信号检测、雷达目标参数估计、跟踪过程等进行了深入讨论；对目前应用日益广泛的相控阵雷达与数字阵列雷达、成像雷达、目标识别等问题均单列专门章节进行了认真的阐述。

本书内容新颖，系统性强，理论联系实际，突出工程实现和应用。特别值得称道的是，对书中讨论的主要内容，作者均给出了有关 MATLAB 的计算、仿真程序，这将有利于有关人员的学习、参考，增加了本书的使用价值。相信本书的出版会对雷达与有关专业的教学、对雷达领域的科研人员和工程技术人员都将起到很好的参考作用。

中国工程院院士 张发义

2012年7月



前 言

雷达作为一种全天时、全天候、远距离工作的传感器,可以安置在地面、车辆、舰船、飞机、导弹、卫星等多种平台上,在军事和民用等领域都具有重要的应用价值。本书结合现代雷达技术的迅速发展,介绍了系统的理论和丰富的实践技能与关键技术,使读者具备必要的背景知识以进行雷达系统的分析与设计工作。

本书是作者在过去近 20 年从事雷达系统理论与工程设计方面工作,以及自 1998 年至今一直给研究生主讲“雷达系统分析”课程的基础上编写而成的,融入了作者丰富的教学经验、工程实践以及一些科研成果,其目的是为了使读者能在学习雷达原理与雷达系统理论的基础上,系统、全面、深入地了解和掌握雷达系统的分析和设计方法。

第 1 章绪论,简述了雷达的发展概况、雷达工作原理与分类、雷达的基本组成、雷达的主要战术与技术指标、雷达的生存与对抗(即抗干扰、抗反辐射导弹、反低空入侵、反隐身)技术等知识。

第 2 章雷达系统的基本知识,从雷达系统的角度简单介绍了雷达的发射机、接收机、天线的基本组成和主要性能指标,以及电波传播、终端设备及其信息处理等方面的基本知识,以便读者能对雷达系统有一个全面的认识 and 了解。

第 3 章雷达方程,从基本雷达方程入手,介绍了描述目标的散射截面积(RCS)、雷达的系统损耗,以及几种干扰下的雷达方程和几种体制的雷达方程。

第 4 章雷达信号波形,首先给出了雷达信号的数学表达及其分类,然后介绍了模糊函数的概念和雷达分辨理论,重点分析了一些典型的常用雷达信号波形及其特征,讨论了脉冲雷达的距离和多普勒模糊问题,以及连续波雷达的有关内容,最后介绍了利用直接数字频率合成(DDS)技术产生常用雷达波形的的方法。

第 5 章雷达信号处理的基本方法,主要介绍了雷达中的一些常用的信号处理方法,包括数字中频正交采样、脉冲压缩、步进频率综合、拉伸处理等,以及 FFT、窗函数在雷达信号处理中的应用,并给出了这些信号处理方法的 MATLAB 仿真程序。

第 6 章杂波与杂波抑制,介绍了杂波的类型及其特征,主要介绍抑制杂波的 MTI/AMTI、MTD 滤波器的设计方法、对杂波抑制的性能的分析与计算方法,以及杂波图和杂波自适应控制相关知识。给出了这些 MTI/AMTI、MTD 滤波器设计的 MATLAB 程序及其仿真结果。

第 7 章干扰与抗干扰技术,介绍了雷达干扰的类型、特征,概述了雷达常用的抗干扰措施,重点介绍副瓣对消、旁瓣消隐等抗干扰的信号处理方法及其性能。

第 8 章雷达信号检测,介绍了基本检测过程、雷达信号的最佳检测、脉冲积累和二进制积累的检测性能、自动检测等方面的基本知识,推导了不同情况下的检测性能的计算公式,并给出了对应的 MATLAB 计算程序,还介绍了几种均值类 CFAR 的原理、性能及其仿真结果。

第 9 章参数测量与跟踪,介绍了雷达测量的基本原理,重点阐述了角度测量与跟踪、

距离测量与跟踪、多普勒测量等，分析了雷达测量的主要误差；介绍了多目标跟踪滤波的相关知识，描述了 $\alpha\beta\gamma$ 滤波器和卡尔曼滤波器在目标航迹跟踪滤波中的应用。

第 10 章相控阵雷达与数字阵列雷达，介绍了相控阵雷达的工作原理、组成与分类，重点介绍了相控阵雷达、数字阵列雷达中经常用到的数字波束形成(DBF)、自适应数字波束形成(ADBF)等阵列信号处理方面的基础知识，以及阵列雷达的数字单脉冲测角等。

第 11 章雷达成像技术，介绍了雷达成像的基本概念、SAR 成像原理及其信号处理方法，简单介绍了单脉冲三维成像技术。

第 12 章雷达系统设计案例，介绍了雷达系统设计的一般流程，给出了某地面制导雷达、弹载末制导雷达、阵列雷达这三种体制雷达的设计案例。

本书的主要特点可以概括如下：

(1) 系统全面，由浅入深，适合不同层次的读者；

(2) 图文并茂，全书给出了 400 多幅图形，直观生动，便于读者更好地理解；

(3) 理论联系实际，将大量工程实践融入其中；

(4) 给出了非常经典的 MATLAB 仿真程序，为读者提供了雷达系统分析与设计的手把手的经验。

MATLAB 作为雷达工程技术人员必不可少的工具，它的程序设计应以矩阵为单元，尽量不用“for”循环语句，读者从本书给出的 MATLAB 程序可以仔细体会到其中的奥妙。

本书第 1、4、7、8、9、12 章由陈伯孝撰写，第 2、3 章由陈伯孝、杨林撰写，第 5、6 章由朱伟撰写，第 10 章由陈伯孝、朱伟撰写，第 11 章由孙光才、陈伯孝撰写。全书由陈伯孝设计、撰写大纲并统稿。在本书的撰写过程中，得到了西安电子科技大学张守宏教授等的指导与帮助，并提出了宝贵的修改意见；得到了博士研究生陈根华、马严和硕士研究生王海明、李娜、李丽、杨瑞兴、周士雷、戴巧娜、任腊梅、冯凯凯等的大力支持和帮助，在此我们一并表示衷心的感谢。

本书作者一直从事雷达系统与雷达信号处理方面的研究工作，承担多项国家重大课题，具有很深的专业知识和丰富的实际经验，并发表了 130 余篇雷达系统与雷达信号处理方面的学术论文。这些均构成了本书很好的写作基础。本书也正是作者近 20 年从事雷达系统与雷达信号处理方面的科研、教学工作的总结。作者清楚地阐述了雷达的一些基本概念及其物理含义，使得本书既适合雷达方面的初学者，让读者明白如何利用过去学习的电子信息工程专业的基础知识去解决实际问题，同时也兼顾雷达工程技术人员，给出了作者的一些最新研究成果，内容丰富。因此，本书既适合作为高等院校相关专业的雷达课程教材或教学参考书，又适合一般工程技术人员和雷达领域研究人员参考。由于本书涉及内容较广，建议用于本科生的“雷达原理”、“雷达系统”课程教学时可以选择部分章节的内容。

由于雷达技术的快速发展，新的技术不断涌现，本书不能将所有最新技术都反映出来，敬请读者谅解。由于作者的水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

感谢雷达信号处理国防科技重点实验室和西安电子科技大学出版社的支持，感谢责任编辑对本书编辑出版付出的辛勤劳动。

陈伯孝

2012 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.3 方向图传播因子	68
1.1 雷达的发展概况	1	2.6 终端设备及其信息处理	71
1.2 雷达工作原理与分类	2	2.6.1 雷达终端设备	71
1.2.1 基本组成	2	2.6.2 雷达信息的录取	73
1.2.2 雷达分类	3	2.6.3 其它参数的录取	74
1.2.3 雷达的工作频率	4	2.6.4 雷达数据处理	75
1.2.4 从雷达回波提取的目标位置信息	5	练习题	76
1.2.5 多普勒频率	5		
1.3 雷达的主要战术与技术指标	10	第 3 章 雷达方程	79
1.3.1 主要战术指标	10	3.1 基本雷达方程	79
1.3.2 主要技术指标	13	3.2 目标的散射截面积 (RCS)	83
1.4 雷达的生存与对抗	14	3.2.1 RCS 的定义	83
1.4.1 电子干扰与抗干扰技术	14	3.2.2 影响 RCS 的因素	85
1.4.2 雷达抗反辐射导弹技术	16	3.2.3 RCS 的计算	88
1.4.3 雷达反低空入侵技术	18	3.2.4 RCS 的测量	91
1.4.4 飞机隐身与雷达反隐身技术	19	3.2.5 目标起伏模型	93
		3.3 系统损耗	97
第 2 章 雷达系统的基本知识	24	3.3.1 传输和接收的损耗	97
2.1 雷达系统的基本组成	24	3.3.2 天线波束形状损耗	97
2.2 雷达发射机	25	3.3.3 叠加损耗	98
2.2.1 发射机的基本组成	25	3.3.4 信号处理损耗	99
2.2.2 发射机的主要性能指标	27	3.4 存在干扰时的雷达方程	101
2.2.3 固态发射机	31	3.4.1 自卫式干扰 (SSJ) 下的雷达	
2.3 雷达接收机	32	方程	102
2.3.1 接收机的基本组成	32	3.4.2 远方支持干扰 (SOJ) 下的雷达	
2.3.2 接收机的主要性能指标	34	方程	103
2.3.3 接收机的增益控制	43	3.4.3 干扰情况下的雷达距离缩减	
2.3.4 滤波和接收机带宽	45	因子	104
2.3.5 数字接收机	50	3.5 雷达方程的几种形式	105
2.3.6 雷达接收机中 A/D 变换器的		3.5.1 双基地雷达方程	105
选取	50	3.5.2 搜索雷达方程	107
2.4 天线	52	3.5.3 低脉冲重复频率的雷达方程	110
2.4.1 雷达对天线的要求	53	3.5.4 高脉冲重复频率的雷达方程	111
2.4.2 天线的主要类型	53	3.6 本章的 MATLAB 程序	112
2.4.3 天线的主要性能指标	54	程序 3.1 基本雷达方程的计算	
2.5 电波传播	59	(radar_eq.m)	113
2.5.1 大气层对电波传播的影响	60	程序 3.2 双基地雷达方程的计算	
2.5.2 地面反射对电波传播的影响	64	(shuangjidi_req.m)	113

程序 3.3 搜索雷达方程的计算 (power_aperture.m)	113	程序 4.3 线性调频脉冲信号模糊函数的 计算(af_lfm.m)	172
程序 3.4 低脉冲重复频率雷达方程的计算 (lprf_req.m)	113	程序 4.4 巴克码序列的波形、频谱及模糊 函数的计算(af_barker.m)	173
程序 3.5 高脉冲重复频率雷达方程的计算 (hprf_req.m)	114	程序 4.5 步进频率脉冲信号模糊函数的 计算(af_sfw.m)	174
练习题	114	练习题	175
第 4 章 雷达信号波形	116	第 5 章 雷达信号处理的基本方法	177
4.1 雷达信号的数学表示与分类	116	5.1 雷达信号处理的任务与分类	177
4.1.1 雷达信号的数学表示	116	5.2 雷达回波信号模型	179
4.1.2 雷达信号的分类	119	5.3 数字中频正交采样	180
4.2 模糊函数与雷达分辨率	121	5.3.1 模拟正交相干检波器的不足	180
4.2.1 模糊函数的定义及其性质	121	5.3.2 数字中频正交采样的原理	181
4.2.2 雷达分辨理论	123	5.3.3 数字中频正交采样的实现方法	183
4.2.3 单载频脉冲信号的模糊函数	126	5.4 脉冲压缩处理	188
4.3 线性与非线性调频脉冲信号	131	5.4.1 线性调频脉冲信号的压缩处理	188
4.3.1 线性调频(LFM 或 Chirp)脉冲 信号	132	5.4.2 LFM 信号的距离-多普勒测不准 原理	192
4.3.2 非线性调频脉冲信号	135	5.4.3 相位编码信号的脉冲压缩处理	193
4.4 相位编码脉冲信号	139	5.4.4 相位编码信号的多普勒敏感性	196
4.4.1 二相编码信号及其特征	139	5.4.5 LFM 信号与相位编码信号的 比较	197
4.4.2 巴克(Barker)码	141	5.5 拉伸信号处理	198
4.4.3 M 序列编码信号	143	5.6 步进频率信号的合成处理	202
4.5 相参脉冲串信号	145	5.7 FFT 在雷达信号处理中的应用	206
4.6 步进频率脉冲信号	149	5.8 窗函数及其在雷达信号处理中的 应用	206
4.6.1 步进频率(跳频)脉冲信号	149	5.9 多脉冲积累的处理方法	211
4.6.2 调频步进脉冲信号	152	5.9.1 相干积累的处理方法	212
4.7 正交波形	153	5.9.2 非相干积累的常用处理方法	212
4.8 距离与多普勒模糊	155	5.10 MATLAB 程序清单	217
4.8.1 距离模糊及其消除方法	156	程序 5.1 线性调频脉冲信号的脉压 程序(LTM_comp.m)	217
4.8.2 速度模糊及其消除方法	159	程序 5.2 二相编码脉冲信号的脉压 程序(PCM_comp.m)	217
4.9 连续波信号与连续波雷达	161	程序 5.3 Stretch 信号的处理程序 (stretch_lfm.m)	218
4.9.1 线性调频连续波雷达	162	程序 5.4 步进频率脉冲综合处理 程序(SFW_HRR.m)	218
4.9.2 多频率连续波雷达	167	练习题	218
4.10 基于 DDS 的任意波形产生方法	167	第 6 章 杂波与杂波抑制	220
4.10.1 DDS 技术简介	167	6.1 概述	220
4.10.2 基于 DDS 的波形产生器的 设计	168		
4.11 MATLAB 程序清单	171		
程序 4.1 单载频矩形脉冲模糊函数的 计算(af_sp.m)	171		
程序 4.2 单载频高斯脉冲模糊函数的计算 (af_guss.m)	172		

6.2 雷达杂波	221	7.2.1 遮盖性干扰的分类	272
6.2.1 面杂波	221	7.2.2 遮盖性干扰的效果度量	273
6.2.2 体杂波	226	7.2.3 噪声干扰	274
6.2.3 杂波的统计特性	228	7.3 欺骗性干扰	276
6.2.4 天线扫描引起的杂波功率谱 展宽	232	7.3.1 欺骗性干扰的分类	276
6.3 MTI/MTD 性能指标	233	7.3.2 距离欺骗干扰	278
6.3.1 杂波衰减和对消比	233	7.3.3 速度欺骗干扰	280
6.3.2 改善因子	233	7.3.4 角度欺骗干扰	282
6.3.3 杂波中的可见度	234	7.4 无源干扰	283
6.4 动目标显示(MTI)	234	7.5 雷达抗干扰的主要措施	285
6.4.1 延迟线对消器	235	7.6 低副瓣、超低副瓣天线技术	286
6.4.2 参差重复频率	238	7.6.1 截获因子与低截获概率雷达	286
6.4.3 优化 MTI 滤波器	241	7.6.2 低副瓣、超低副瓣天线技术	287
6.4.4 自适应 MTI (AMTI)	246	7.7 副瓣对消(SLC)	287
6.4.5 MTI 处理仿真实验	248	7.7.1 SLC 的工作原理	287
6.5 动目标检测(MTD)	249	7.7.2 SLC 的主要类型	290
6.5.1 MTI 级联 FFT 的滤波器组	250	7.7.3 SLC 的自适应权值计算方法	292
6.5.2 优化 MTD 滤波器组	252	7.7.4 SLC 的性能分析	294
6.5.3 零多普勒处理	256	7.8 旁瓣消隐(SLB)	296
6.5.4 自适应 MTD (AMTD)	258	7.8.1 SLB 的工作原理	296
6.6 杂波自适应控制	260	7.8.2 SLB 的性能分析	297
6.6.1 杂波图	260	7.9 频率捷变	298
6.6.2 杂波轮廓图	261	7.9.1 频率捷变技术的发展	298
6.7 本章 MATLAB 程序及函数清单	264	7.9.2 自适应频率捷变技术	298
程序 6.1 杂波 RCS 和 CNR 的计算 (clutter_rcs. m)	264	7.10 基于谱特征的箔条干扰识别方法	299
程序 6.2 二项式级数参差 MTI 滤波器的 设计(cenci_MTI. m)	265	7.10.1 箔条干扰实测数据的频谱 特征	299
程序 6.3 用特征矢量法设计 MTI 滤波器 (eig_MTI. m)	265	7.10.2 箔条干扰识别方法	300
程序 6.4 用零点分配法设计 MTI 滤波器 (zero_MTI. m)	266	练习题	302
程序 6.5 用 FFT 滤波器组设计 MTD 滤波器(fft_MTD. m)	266	第 8 章 雷达信号检测	304
程序 6.6 点最佳 MTD 滤波器组的设计 (point_MTD. m)	266	8.1 基本检测过程	304
程序 6.7 等间隔 MTD 滤波器组的设计 (inter_MTD. m)	267	8.2 雷达信号的最佳检测	307
练习题	267	8.2.1 噪声环境下的信号检测	307
第 7 章 干扰与抗干扰技术	269	8.2.2 虚警概率	309
7.1 干扰的主要类型	269	8.2.3 检测概率	310
7.2 遮盖性干扰	271	8.2.4 信号幅度起伏的检测性能	313
		8.3 脉冲积累的检测性能	314
		8.3.1 相干积累的检测性能	314
		8.3.2 非相干积累的检测性能	314
		8.3.3 相干积累与非相干积累的性能 比较	315
		8.3.4 积累损失	317
		8.3.5 起伏脉冲串的检测性能	320

8.4 二进制积累	324	9.5.1 对单个脉冲或采样的多普勒 测量	364
8.4.1 二进制积累器的工作原理	324	9.5.2 对脉冲串的多普勒测量	364
8.4.2 二进制积累器的检测性能	325	9.5.3 连续波雷达多普勒频率的测量	367
8.4.3 几种常用的二进制检测器	326	9.6 多目标跟踪	367
8.4.4 二进制积累的优缺点	328	9.6.1 边扫描边跟踪雷达	367
8.5 自动检测——恒虚警率处理	329	9.6.2 固定增益跟踪滤波器	369
8.5.1 单元平均 CFAR	329	9.6.3 卡尔曼滤波器	375
8.5.2 其它几种 ML 类 CFAA	331	9.6.4 $\alpha\beta\gamma$ 滤波器与卡尔曼滤波器之间 的关系	377
8.5.3 几种 ML 类 CFAR 的性能 比较	333	9.7 MATLAB 程序和函数列表	379
8.6 计算检测性能的 MATLAB 程序	335	程序 9.1 单脉冲测量的仿真 (mono_pulse.m)	379
程序 8.1 非相干积累改善因子的 计算(improv_fac.m)	335	程序 9.2 $\alpha\beta\gamma$ 滤波器的仿真 (ghk_tracker.m)	380
程序 8.2 用 Parl 数值积分方法计算 检测概率(marcumsq.m)	336	程序 9.3 卡尔曼滤波器的仿真 (kalman_filter.m)	380
程序 8.3 不完全 Gamma 函数的计算 (incomplete_gamma.m)	336	程序 9.4 $\alpha\beta\gamma$ 滤波器的计算实例	381
程序 8.4 Swerling 目标检测性能的 计算(pd_swerling.m)	338	程序 9.5 卡尔曼滤波器的计算实例	381
程序 8.5 检测概率与单个脉冲信噪比 的关系(Fig8.7.m)	340	本章附录 噪声背景下的最佳估计	382
程序 8.6 计算信号幅度服从瑞利分布 的检测性能(Fig8.9.m)	340	练习题	389
程序 8.7 Swerling V 型目标检测性能的 计算(Fig8.14.m)	340	第 10 章 相控阵雷达与数字阵列 雷达	391
程序 8.8 Swerling I 型目标检测性能的 计算(Fig8.15a.m)	341	10.1 近场和远场	391
练习题	341	10.2 相控阵天线的基本原理	392
第 9 章 参数测量与跟踪雷达	343	10.2.1 线阵天线的方向图函数	392
9.1 概述	343	10.2.2 平面阵列天线的原理与特性	399
9.2 雷达测量基础	344	10.2.3 圆环阵列	404
9.2.1 雷达测量的基本物理量	344	10.3 相控阵雷达系统的组成与特点及 性能指标	405
9.2.2 雷达测量的理论精度	346	10.3.1 相控阵雷达系统的基本组成	405
9.2.3 基本测量过程	350	10.3.2 相控阵雷达的分类	406
9.3 角度测量与跟踪	351	10.3.3 移相器的基本原理及主要 要求	407
9.3.1 圆锥扫描法测角	352	10.3.4 相控阵雷达的特点	409
9.3.2 比幅单脉冲	354	10.3.5 相控阵雷达作用距离的计算	411
9.3.3 比相单脉冲	358	10.4 数字波束形成(DBF)	414
9.4 距离测量与跟踪	359	10.4.1 DBF 的原理	414
9.4.1 单个脉冲的最佳估算器	360	10.4.2 利用 DFT/FFT 进行 DBF	416
9.4.2 脉冲串测距	361	10.4.3 信噪比的改善	417
9.4.3 分裂波门法测距	361	10.5 阵列天线的自适应信号处理	418
9.5 多普勒测量	363	10.5.1 自适应数字波束形成 (ADBF)	418

10.5.2	自适应波束形成最佳权向量 准则	419	11.3.1	SAR 成像原理	447
10.5.3	ADBF 的仿真	422	11.3.2	几何失真	448
10.5.4	阵列天线的 SLC	425	11.3.3	成像性能指标	450
10.6	数字阵列雷达	428	11.3.4	成像模式	451
10.6.1	数字阵列雷达的工作模式 简介	428	11.4	SAR 成像算法	453
10.6.2	数字阵列雷达的基本概念	428	11.4.1	距离徙动和距离徙动差	453
10.6.3	二维数字阵列雷达的数字单 脉冲测角过程	430	11.4.2	距离-多普勒(R-D)成像 算法	454
10.6.4	数字阵列雷达基于窗函数的单 脉冲测角方法	432	11.4.3	频域校正距离弯曲的距离-多普勒 成像算法	456
10.6.5	数字阵列雷达的优势	436	11.4.4	调频变标算法	461
10.7	MATLAB 程序清单	437	11.4.5	解调频算法	464
程序 10.1	线性阵列归一化方向图的 计算(line_array, m)	437	11.5	单脉冲雷达三维成像	467
程序 10.2	平面阵的三维天线方向图的 计算(rect_array, m)	437	11.5.1	单脉冲雷达三维成像基本 原理	468
程序 10.3	基于 MMSE 准则的自适应旁瓣 对消(MMSE, m)	437	11.5.2	目标姿态变化对三维成像的 影响	469
程序 10.4	基于 MSNR 准则的自适应方向 图的计算(MSNR, m)	438	11.5.3	计算机仿真	471
程序 10.5	基于 LCMV 准则的自适应方向 图的计算(LCMV, m)	439	11.5.4	单脉冲成像的应用前景	472
练习题		439	本章附录	驻相点原理	472
第 11 章	雷达成像技术	441	第 12 章	雷达系统设计案例	474
11.1	合成孔径	441	12.1	雷达系统设计的一般流程	474
11.2	合成孔径二维分辨原理	444	12.2	某地面制导雷达系统设计	474
11.2.1	距离分辨率	444	12.3	某末制导雷达系统设计	479
11.2.2	方位分辨率	444	12.4	某阵列雷达信号处理	490
11.3	合成孔径雷达成像	447	附录	雷达中无处不在的分贝	495
			参考文献		498



第 1 章 绪 论

1.1 雷达的发展概况

雷达是英文“Radio detection and ranging”缩写 Radar 的音译,其含义是指利用无线电对目标进行探测和测距。它的基本功能是利用目标对电磁波的散射来发现目标,并测定目标的空间位置。雷达经历了它的诞生和发展初期后,在 20 世纪六七十年代进入大发展时期。随着微电子技术的迅速发展,在 20 世纪中后期,雷达技术进入了一个新的发展阶段,出现了许多新型雷达,例如合成孔径雷达、脉冲多普勒雷达、相控阵雷达等。现代雷达的功能已超出了最早定义雷达的“无线电探测和测距”的含义,已赋以新的内涵——提取目标的更多信息,例如目标的属性、目标成像、目标识别和战场侦察等,从而实现对目标的分类或识别。

下面简单回顾现代雷达发展史上的一些重大事件:

1. 雷达的诞生及发展初期

1886 年,Heinrich Hertz(海因里奇·赫兹)验证了电磁波的产生、接收和散射。

1886~1888 年,Christian Hulsmeyer(赫尔斯姆耶)研制出原始的船用防撞雷达。

1937 年,Robert Watson Watt(沃森·瓦特)设计出第一部可用的雷达——“Chain Home”,并在英国建成。

1938 年,美国信号公司制造的 SCR-268 成为第一部实用的防空火控雷达,其工作频率为 200 MHz,作用距离为 180 km。这种雷达共生产了 3100 部。

1939 年,美国无线电公司(RCA)研制出第一部实用舰载雷达——XAF,安装在“纽约号”战舰上,对飞机的探测距离为 160 km,对舰船的探测距离为 20 km。

2. 二战中的雷达

在第二次世界大战中,雷达发挥了重要作用。用雷达控制高射炮击落一架飞机平均所用炮弹数由 5000 发降为 50 发,命中率提高 99 倍。因此,雷达被誉为第二次世界大战的“天之骄子”。

3. 20 世纪五六十年代的雷达

在这期间,由于航天技术的飞速发展,飞机、导弹、人造卫星以及宇宙飞船等均采用雷达作为探测和控制手段。反洲际弹道导弹系统要求雷达具有高精度、远距离、高分辨率和多目标测量能力,使雷达技术进入蓬勃发展时期;大功率速调管放大器应用于雷达,发射功率比磁控管高两个数量级;这一时期研制的大型雷达用于观察月亮、极光、流星;单

脉冲跟踪雷达 AN/FPS-16 的角跟踪精度达 0.1 mrad ；合成孔径雷达利用装在飞机上较小的侧视天线可产生地面上的一个条状地图；机载脉冲多普勒雷达应用于“波马克”空空导弹的下视和制导；“麦德雷”高频超视距雷达作用距离达 3700 km ；S 波段防空相控阵雷达 AN/SPS-33 在方位维采用铁氧体移相器控制进行电扫，在俯仰维采用频扫方式；超远程相控阵雷达 AN/FPS-85 用于外空监视和洲际弹道导弹预警；等等。

4. 20 世纪七八十年代的雷达

这一时期合成孔径雷达、相控阵雷达和脉冲多普勒雷达得到了迅速发展。相控阵用于战术雷达。同期，美国研制出 E-3 预警机等。

5. 20 世纪 90 年代的雷达

20 世纪 90 年代，随着微电子技术的迅速发展，雷达进一步向数字化、智能化方向发展。同时，反雷达的对抗技术也迅速发展起来。一些主要军事大国纷纷研制一些新体制雷达，例如无源雷达、双(多)基地雷达、机(或星)载预警雷达、稀布阵雷达、多载频雷达、微波成像雷达、毫米波雷达、激光雷达等。

6. 新世纪的雷达

新世纪，随着现代战争的需要，雷达将是高性能、多功能的综合体，即集雷达与通信、指挥控制、电子战等于一体。为了减小天线孔径、提高机动性并降低成本，雷达将由过去集中式大孔径天线向分布式小孔径雷达方向发展；从频率源、发射到接收，雷达已从模拟向数字化方向发展，提出了数字化雷达的概念。数字化雷达在每个脉冲重复周期采用不同的信号形式，提高了抗干扰能力。从信号处理和检测的角度，雷达将向智能化方向发展。综合利用多部雷达协同探测与雷达组网，可以提高雷达的探测能力和覆盖范围。同时，雷达将向网络化方向发展。

在雷达技术得到迅速发展的同时，由于敌我双方军事斗争的需要，雷达亦面临着生存和发展的双重挑战。雷达面临的威胁主要有四个方面：一是隐身技术。由于采用隐身技术，使得目标的散射截面积(RCS)大幅度降低，雷达接收到的目标散射回波信号微乎其微，以至于难以发现目标。二是综合电子干扰(ECM)。由于快速应变的电子侦察和强烈的电子干扰，使得雷达难以正确地发现并跟踪目标。三是反辐射导弹(ARM)。高速反辐射导弹已成为雷达的克星，只要雷达一开机，被敌方侦察到以后，很容易利用 ARM 将雷达摧毁。四是低空突防。对具有掠地、掠海能力的低空、超低空飞机和巡航导弹，雷达一般难以发现。这就是人们常说的雷达面临的“四大威胁”。

1.2 雷达工作原理与分类

1.2.1 基本组成

雷达系统的基本组成如图 1.1 所示。通常包括波形产生器、发射机、接收机、A/D 变换、信号处理、数据处理、显示器、信息存储与传输、天线及其伺服装置、电源等部分。波形产生器产生一定工作频率、一定调制方式的射频激励信号，也称为激励源，同时，产生相干本振信号送给接收机；发射机对激励源提供的射频激励信号进行功率放大，再经收发

开关馈电至天线，由天线辐射出去；目标回波信号经天线和收发开关至接收机，再由接收机对接收信号进行低噪声放大、混频和滤波等处理；信号处理的作用是抑制非期望信号（杂波、干扰），通过相干积累或非相干积累等措施以提高有用信号的信噪比，并对目标进行自动检测与跟踪等。

通常将目标航迹的关联、跟踪滤波、航迹管理等称为雷达的数据处理。目标航迹及相关信息在屏幕上显示的同时，通过网络等设备传输至各级指挥系统。

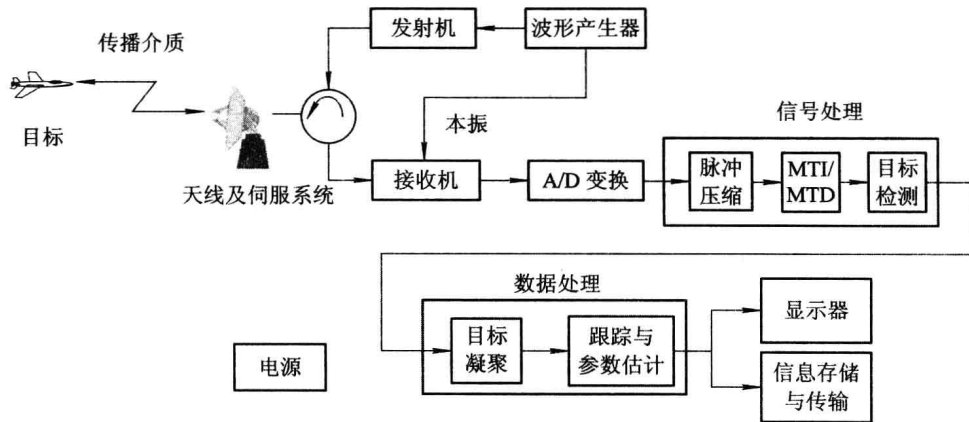


图 1.1 雷达系统的基本组成

1.2.2 雷达分类

根据雷达的功能及工作方式的不同，雷达有多种分类方法。

1) 按作用分类

雷达按作用可分为军用和民用两大类。军用雷达根据其作战平台所处位置又分为地面雷达、舰载雷达、机载雷达、星载雷达、末制导雷达(弹载雷达)等。地面雷达按其功能又包括监视雷达(警戒雷达)、跟踪雷达、火控雷达、目标引导与指示雷达等。机载雷达包括机载预警雷达、机载火控雷达、轰炸雷达、机载气象雷达、机载空中侦察雷达、机载测高雷达等。

民用雷达主要包括空中交通管制雷达、港口管制雷达、气象雷达、探地雷达、汽车防撞或自动驾驶雷达、道路车辆测速雷达等。

2) 按信号形式分类

雷达按信号形式分为脉冲雷达和连续波雷达，以及介于两者之间的准连续波雷达。脉冲雷达又分为脉冲压缩雷达、频率捷变雷达和噪声雷达。根据信号带宽可分为窄带雷达、宽带雷达和超宽带雷达。根据信号的相参性可分为相参雷达和非相参雷达。现代雷达一般都是为相参雷达。

3) 按天线波束扫描形式分类

雷达按天线波束扫描形式分为机械扫描雷达、电扫描雷达，以及机械扫描与电扫描相结合的雷达。

4) 按测量的目标参数分类

雷达按测量的目标参数可分为两坐标(距离、方位)雷达、三坐标(距离、方位、仰角或

高度)雷达、测高雷达、测速雷达、敌我识别雷达、成像雷达等。

5) 按角度跟踪方式分类

跟踪雷达按角度跟踪方式可分为圆锥扫描雷达、单脉冲雷达。

1.2.3 雷达的工作频率

雷达的工作频率范围较广,从几兆赫(MHz)到几十吉赫(GHz)。工程上将雷达的工作频率分为不同的频段,表 1.1 列出了雷达频段和频率的对应关系以及各频段的主要应用场合和特点。例如,L 波段代表波长以 22 cm 为中心,S 波段以 10 cm 为中心,C 波段以 5 cm 为中心,X 波段以 3 cm 为中心,Ku 波段以 2.2 cm 为中心,Ka 波段以 8 mm 为中心。根据工作波长,雷达可分为超短波雷达、米波雷达、分米波雷达、厘米波雷达、毫米波雷达等。这里字母频段名称不能代表雷达工作的实际频率。

表 1.1 雷达的工作频率

波段名称	频率(f)范围	波长 $\lambda=c/f$	主要应用场合及特点	国际电信联盟分配的 雷达频率范围
HF	3~30 MHz	100~10 m	超视距雷达,很远的作用距离,但分辨率和精度低	
VHF	30~300 MHz	1000~100 cm	远程监视(约 200~500 km),具有中等分辨率和精度	138~144 MHz, 216~225 MHz
UHF	300~1000 MHz	100~30 cm		420~450 MHz, 890~942 MHz
L	1~2 GHz	30~15 cm	远程监视,具有中等分辨率和适度气象效应	1215~1400 MHz
S	2~4 GHz	15~7.5 cm	中程监视(约 100~200 km)和远程跟踪(约 50~150 km),具有中等精度,在雪和暴雨下气象效应严重	2.3~2.5 GHz, 2.7~3.7 GHz
C	4~8 GHz	7.5~3.75 cm	中近程监视、跟踪和制导,高精度,在雪和中雨下气象效应严重	5.25~5.925 GHz
X	8~12 GHz	3.75~2.5 cm	近程监视,高精度远程跟踪,在雨中减为中程或近程(约 25~50 km)	8.5~10.68 GHz
Ku	12~18 GHz	2.5~1.67 cm	近程跟踪和制导(约 10~25 km),专门用于天线尺寸有限且不需要全天候工作的场合;广泛应用于机载雷达系统	13.4~14 GHz, 15.7~17.7 GHz
K	18~27 GHz	1.67~1.11 cm		24.05~24.25 GHz
Ka	27~40 GHz	11.1~7.5 mm		33.4~36 GHz
V	40~75 GHz	7.5~4.29 mm	很近距离跟踪(约 1~2 km),如汽车防撞与自动驾驶雷达	59~64 GHz
W	75~110 GHz	4.29~2.7 mm	很近距离跟踪和制导(约 2~5 km)	76~81 GHz, 92~100 GHz
mm	110~300 GHz	<2.7 mm	很近距离跟踪和制导(约 1~2 km)	

注: c 为光速, $c=3 \times 10^8$ m/s。

1.2.4 从雷达回波提取的目标位置信息

1) 距离

普通脉冲雷达是通过测量发射信号传播到目标并返回来的时间来测定目标的距离的。如图 1.2 所示。假设延迟时间为 τ , $\tau=2R/c$, 则目标的距离 R 为

$$R = \frac{c \cdot \tau}{2} \quad (1.2.1)$$

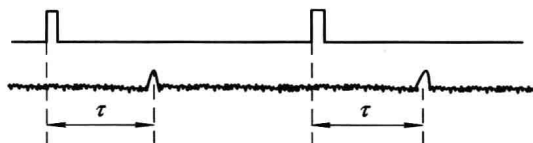


图 1.2 发射脉冲和目标回波示意图

这种基于窄脉冲的测距方法, 脉冲越窄, 测距精度越高。但是在峰值功率受限的情况下, 发射窄脉冲辐射的能量有限。另一种测距方法是采用脉冲压缩波形(将在后面章节中介绍)。

2) 方向(方位和仰角)

目标的方向是通过测量回波的波前到达雷达的角度来确定的。雷达一般使用方向性天线, 即具有窄辐射方向图的天线进行波束方位维和俯仰维的扫描。当接收信号的能量最大时, 天线所指的方向就是目标所在的方向。这种或其它测量方向的方法都假定大气不扰乱无线电波的直线传播。

入射波前的方向也可通过测量两个分离的天线所接收的相位差来决定, 而相位差则取决于入射波前与两个天线连线的夹角。两个天线分开越远, 则精度越高。然而如果天线分得太开, 就会在两个天线的合成方向图中出现大小等于主波束的栅瓣而产生模糊的测量结果。早期的比幅单脉冲雷达在每个平面上使用两个天线(或用两个馈源照射单个反射体)来进行角度测量, 但这两个天线中心的间隔应小于半个波长, 从而避免了栅瓣造成的模糊。比相单脉冲雷达的两个天线相距多个波长, 但各个天线的方向性抑制了栅瓣。

3) 高度

假设目标的斜距为 R , 仰角为 θ , 则目标的高度为

$$H = R \cdot \sin\theta + h \quad (1.2.2)$$

其中 h 为天线高度。如果考虑地球曲率半径 ρ 的影响, 则目标的高度为

$$H = R \cdot \sin\theta + h + \frac{R^2}{2\rho} \quad (1.2.3)$$

4) 目标的尺寸和形状

利用目标的一维距离像可以大致确定目标在距离维的尺寸和散射点的分布; 利用合成孔径雷达成像可以实现对地形的侦察和对目标的识别; 通过对目标的三维成像, 特别是单脉冲三维成像, 可以对目标的三维尺寸和形状进行特征提取。

1.2.5 多普勒频率

当目标与雷达之间存在相对运动时, 若雷达发射信号的工作频率为 f_0 , 则接收信号的