

国防电子信息技术丛书

Radar System Analysis and Modeling

雷达系统 分析与建模

[美] David K. Barton 著

南京电子技术研究所 译

罗 群 倪嘉骊 范国平 总审



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书在全面归纳雷达系统原理的基础上,对雷达性能进行了分析与数学建模。全书前6章为基础理论部分,包括:雷达距离方程,目标检测理论,目标、杂波和干扰分析,雷达天线分析,雷达信号波形设计和信号处理,传播特性分析。第7章和第8章分别介绍了雷达监视、雷达测量与跟踪方法。最后一章对雷达损耗进行了分析。本书覆盖了雷达系统性能分析和数学模型建设,内容系统、完整。每章后都附有参考文献、习题、仿真程序及其说明,便于读者进一步学习和研究。

本书可作为高等院校电子工程专业高年级本科生和研究生的参考教材,也可作为雷达专业工程技术人员的参考用书。

© 2005 ARTECH HOUSE, INC.

685 Canton Street, Norwood, MA 02062.

本书中文翻译版专有版权由 Artech House Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2006-1683

图书在版编目(CIP)数据

雷达系统分析与建模/(美)巴顿(Barton, D. K.)著;南京电子技术研究所译.

北京:电子工业出版社,2007.6

(国防电子信息技术丛书)

书名原文:Radar System Analysis and Modeling

ISBN 978-7-121-04143-3

I. 雷... II. ①巴... ②南... III. ①雷达-系统分析 ②雷达-系统建模 IV. TN95

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第041993号

责任编辑:余 义

印 刷:北京人卫印刷厂

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:787×1092 1/16 印张:26 字数:666千字

印 次:2007年6月第1次印刷

定 价:69.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,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。

《雷达系统分析与建模》编委会

总 审 罗 群 倪嘉骊 范国平
总 校 周万幸 程少云 方能航

翻译委员会

主 任 马 林 马振康
副 主 任 邢文革 于文震 林幼权
委 员 朱宝明 邓大松 陈文英 张春雁 周 琪 张军华 刘湘梅 严 伟 顾春平
程 钧 吴明敏

校对委员会

主 任 陈国海 张友益
副 主 任 徐 进 金 林 胡明春
委 员 余宏明 朱景明 汪 洋 陈绪元 吴道庆 刘炳奇 傅有光 蒋微波 罗 敏
何孝芸 史国庆 王 震 童勤勋

编辑委员会

主 任 陈 玲 季 宏
副 主 任 陈勇华 周晓群
委 员 李 明 陆 萍 王炳如 朱宝明 邓大松 杨慰民 蔡晓睿 王兴江 陈 艳
朱峥嵘 童文俊 汪 琳 史江谨 林 灿 宋于卿 钱惠萍 张文勇 谷 静
强素军 张 权 周建兴 吴勇斌 曹玉林

关于作者

David K. Barton 巴顿是一名雷达系统顾问，现生活于美国新罕布什尔州的汉诺威。他于1927年生于康涅狄格州的格林威治市，1944年到1949年在美国哈佛大学学习，其间有两年因在美国陆军白沙试验场服役而中断学业。在1949年获得物理学学士学位后，他作为一位民间工程师回到了白沙试验场。1953年，他调到位于新泽西州 Fort Monmouth 的信号实验室，启动了第一部单脉冲测量雷达——AN/FPS-16的研制。1955年，他加入RCA公司，进行雷达的研制并参与系统的测试和评估。由于此项工作，1958年RCS授予他首届W. Sarnoff杰出工程成就奖。他还于1960年将该雷达按比例扩大建造了AN/FPS-49雷达，用于弹道导弹预警系统。该系统在阿拉斯加和大不列颠经过40年的运行后最近才被更换。



从1963年到1984年，他是马萨诸塞州 Wayland 和 Bedford 的雷声公司的一名顾问科学家。在此，他为美国空军提出了AN/TPS-19雷达控制着陆系统的雷达方案，并对大量其他雷达和导弹的研究和工程项目做出了贡献。他于1984年加入ANRO工程公司，从事雷达和导弹系统的研究，直至2004年退休。

David K. Barton 于1972年被推选为IEEE会士，并于1997年成为美国工程院院士。2002年，他获得了IEEE Dennis J. Picard 关于雷达技术和应用奖章。他还曾服务于美国空军科学咨询委员会、防御情报局和陆军研究实验室。自1975年以来，他就是Artech House雷达图书的编辑，其中，本书大约是第140卷。

作者序

欢迎中国读者不吝赐读《雷达系统分析与建模》！

约20年前，本人曾在贵国短暂停留三周，访问了一些致力于雷达研究事业的雷达院所，受到了热烈的欢迎，同时也有幸游览了贵国的一些历史景点。

今天，欣闻贵国同仁已将该书译本付梓出版，不胜荣幸。应出版该译本及参加美国雷达会议的贵国同仁邀请，特为此书作序。希望本书能够对采用新技术、新硬件和日益复杂的新软件的先进雷达研制者们有所裨益。

现代雷达理论和实践早已今非昔比，本人于1946年开始从事雷达系统工程研究，并于1964年出版了处女作《雷达系统分析》，该书同样也出版了中文译本。如今的这本《雷达系统分析与建模》虽然没有完全涵括雷达研究领域过去十年，甚至二十年内的进步，但毕竟代表了一种知识更新和与时俱进。如果本书能够帮助当代的雷达工程师们在雷达事业中有所建树，足慰吾愿！

David K. Barton

2007年3月于汉诺威

前 言

本书是系列丛书中的第三代,该系列丛书是从1964年由Prentice-Hall出版并于1976年由Artech House再版的《雷达系统分析》开始的。在该书多次再版后,1988年Artech House出版了综合二十年来雷达系统理论和实践方面进展的完全修订版《现代雷达系统分析》。现在,几乎又过了二十年,是更新材料以反映雷达技术方面的进一步发展,并发挥现代个人计算机的分析和建模能力的时候了。《雷达系统分析与建模》归纳了雷达系统理论,并为雷达工程师提供了估算各种雷达的性能、综合或选择雷达设计的方法和工具,以满足探测和跟踪的要求。

本书共分9章,从雷达方程开始,作为所有进一步讨论的基础。在第1章中,推导了热噪声中探测距离的标准雷达方程,并且对适合于脉冲雷达、脉冲多普勒(Doppler)雷达和连续波雷达的格式进行了表述。所有这些都扩展到了搜索雷达方程上,以用做后续分析中的多种监视雷达和截获模式下的跟踪雷达的基础。然后,采用在典型环境下搜索雷达的实例来推导和说明在干扰、杂波和组合干扰源的环境下探测距离的估算方程。

雷达检测理论在第2章中进行了归纳,从稳定目标的单个脉冲的检测开始,推进到多脉冲积累、起伏目标和分集系统中的检测。该分析的一项最新结果是针对具有 χ^2 统计的信号的一对“通用检测方程”,这对方程包括了人们熟悉的Swerling目标模型和在连续脉冲间或采样间呈现部分相关特性的各种信号。这两个方程给出了给定信噪比时的探测概率和给定探测概率所要求的信噪比(可检测性因子),以及关于规定的虚警概率值、积累脉冲数和积累期间获得的独立脉冲采样数方面的精确结果。它们调用 χ^2 分布积分及其逆函数,而这两个函数已构入个人计算机最通用的计算引擎,并允许对各种搜索扫描、波形和处理技术进行迅速的比较。

第3章归纳了目标和干扰。介绍了目标横截面积、起伏和闪烁理论。讨论了双基地雷达横截面积和单基地雷达横截面积。针对陆地、气象、箔条和鸟杂波,介绍了简单而现实的模型,概述了干扰类型。

雷达天线这一重要内容涵盖在第4章中,介绍了基本理论并对适用于反射面、透镜和阵列天线的参数与关系式进行了概述。叙述的目的不是帮助天线设计,而是给雷达系统工程师和分析师在规范、建模或选择天线类型和可实现且宜于满足性能要求的参数方面予以指导。第5章类似地介绍了波形和信号处理概况。首先介绍了模糊函数的理论基础,以及失配滤波器对简单的脉冲和对利用相位代码与频率调制得到的脉冲压缩波形的响应。最后讨论了动目标显示和脉冲多普勒,以及由杂波参数、天线扫描和雷达系统稳定性所引起的性能上的局限。

第6章概述了雷达传播及其对雷达探测和测量的影响。涵盖了大气和气象衰减、地球表面的反射和绕射效应,以及大气折射。依据出版的文献,概述了对流导透镜损耗和电离层法拉第(Faraday)旋转效应。

前6章的基础理论现在在第7章中用于雷达监视。利用搜索雷达方程作为基础,但也考虑杂波的影响,详细讨论了两坐标雷达和三坐标雷达的空中监视。然后,对空中和导弹目标的水平扫描、海用导航雷达,以及由陆基及机载雷达完成的表面监视这些特殊情况进行了讨论。本章最后附有关于监视雷达跟踪文件数据处理和监视雷达电子对抗与电子反对抗方面的材料。

在第8章中,介绍了雷达跟踪和测量理论,从圆锥扫描和扇区扫描跟踪器的简要概述开始,一直到单脉冲系统的更详细的考虑。本章强调的是精确角度跟踪的困难过程,但也涵盖了距离和多普勒跟踪。然后,讨论转向误差分析步骤,包括动态滞后误差、所有4个雷达坐标上的多路径误差、杂波效应,以及由目标、雷达实现和环境条件引入的其他一些重要误差源。最后一节涉及跟踪雷达电子对抗和电子反对抗。

最后一章的主题是雷达损耗预算,这是一个在先前文献中没有充分阐述的话题。雷达性能方面的讨论通常强调的是发射机功率、天线孔径、接收机噪声系数和信号处理技术方面的问题。这些参数连同通常经估计或任意分配的损耗因子一起,突出地出现在雷达方程中。前面各章中描述的许多损耗分量都列在第9章中,并对其中一些进行了详细的分析。对发射机到天线、天线到目标、目标到天线、天线到接收机这条路径的射频部分,以及信号处理机内部出现的许多损耗分量的定量分析过程进行了描述或引用了参考资料。对两坐标监视雷达、单脉冲跟踪器和空馈多功能阵列雷达的典型损耗预算进行了介绍。当利用常规雷达方程时,相对于采用给定孔径面积理想实现的总的损耗,通常是20 dB或更高,在搜索雷达方程中接近30 dB。对损耗预算的详细分析,为能最好地利用新技术以提高雷达系统性能提供了指导。如果没有一个详细的损耗因子模型,雷达的模型或分析都是不完善的,而且这些损耗数据在多数雷达指标数据、专业论文和报告中都没有。最后一章中的材料可使目的明确的系统分析师能够填补由于大力推动其喜爱的雷达技术和设计而很少注意损耗的人们而留下的空白。

没有一本教科书(当然也包括本书)能够描述进入雷达系统性能的所有因素。没有一种计算机模型可预见性能估计方面必须考虑的各种元件、电路、分系统、环境和工作步骤。本书和相关的个人计算机程序中采用的方法是要提供一种分析和建模方法,作为分析师改进、精心设计和发展的起始点,以满足新雷达系统和技术所提出的要求。已经采用了Mathcad计算引擎,因为它能够显示所有方程、中间步骤以及最终结果,以便用户检验不寻常特性。用户可轻易地进行所需要的修改,使程序适应新的不寻常的,或未曾料到的系统情况和曾经碰到过的情况。这些程序可应用于许多现有的和建议的雷达设计和工作条件中,无须修改或只需完成对Mathcad中的曲线重新定标这一简单过程。

本书的大多数图表和举例都是利用Mathcad生成的,程序可通过华信教育资源网(www.hxedu.com.cn或www.huaxin.edu.cn)下载,详见本书封底。对于那些更喜欢另一种计算引擎的人来说,每个程序还以HTML格式进行了表述。Mathcad方程格式对于任何一个具有工程或数学背景的人来说都是透明的,而程序可由用户录入到任何一个替代平台。在README文本文件中给出了一些对Mathcad符号的指导,并且下载文件中包含的完整的学术评估版Mathcad 11,在首次安装于计算机的四个月内可供用户使用,同时还提供参考使用的手册。对许多程序来说工作量较大,因此,建议采用Mathcad引擎方法。用户将不会对学习使用这一卓越工具所付出的努力而后悔。

每章的末尾附有习题,并包括了对这些习题的解。用于解题的所有程序均可通过下载获得。

感谢雷达领域中几十年来通过发表论文或个人通信为我提供本书材料的许多同事。我已尝试让他们的贡献通过指名出现在本书中,如果有任何遗漏的话,在此事先道歉。还要非常感谢我的前雷声公司合作伙伴Hal Ward和Paul Hamilton博士,除了提供素材外,他们还对手稿进行了审稿,并提供了有用的建议和校正。还要感谢Mathsoft工程和教育公司为我提供了Mathcad 11学术评估版的软件。

目 录

第 1 章 雷达距离方程	1
1.1 雷达基础	1
1.1.1 基本功能	1
1.1.2 雷达应用	3
1.1.3 雷达频段	3
1.2 距离方程的推导	5
1.2.1 接收到的信号功率	5
1.2.2 双基地雷达方程	6
1.2.3 应答机和电子战方程	6
1.2.4 接收机噪声	7
1.2.5 信噪比	8
1.2.6 射频损耗因子	9
1.2.7 最大作用距离的解	10
1.2.8 利用 Blake 图进行距离计算	10
1.2.9 一般解法	10
1.3 搜索雷达方程	13
1.3.1 均匀搜索的推导	13
1.3.2 搜索雷达方程的重要性	13
1.4 有源干扰时的雷达作用距离	14
1.4.1 远距离噪声干扰的等效温度	14
1.4.2 干扰有效性	15
1.4.3 欺骗性干扰	16
1.4.4 自屏蔽和护卫干扰	16
1.5 有杂波时的雷达作用距离	17
1.5.1 空域杂波: 降雨或箔条	17
1.5.2 空域杂波中的探测距离	19
1.5.3 距离上模糊的杂波	20
1.5.4 表面杂波: 陆地和海面	21
1.6 组合干扰下的探测距离	23
参考文献	24
附录 1A: 关于雷达方程的习题	24
附录 1B: 提供的 Mathcad 工具	26
附录 1C: 习题的解	27

第2章 目标检测理论	28
2.1 噪声统计	29
2.2 对伴有噪声的信号的一个采样进行检波	30
2.2.1 理想的相参检波过程	30
2.2.2 实际检波过程	31
2.2.3 相对于理想系统的检波器损耗	33
2.2.4 匹配滤波器及匹配损耗	33
2.3 脉冲串的积累	34
2.3.1 相参积累	35
2.3.2 视频信号积累	36
2.3.3 二进制积累	38
2.3.4 累积积累	39
2.3.5 积累器加权损耗	40
2.3.6 虚警时间	40
2.3.7 折叠损耗	41
2.4 起伏目标的检测	43
2.4.1 单个采样检测	43
2.4.2 起伏损耗	43
2.4.3 情况1信号的积累	43
2.4.4 其他目标模型	45
2.4.5 分集增益	47
2.4.6 χ^2 目标的通用方程式	48
2.4.7 起伏目标的二进制积累	49
2.4.8 起伏目标的累积积累	49
2.5 顺序检测	50
2.5.1 两步顺序探测概率	50
2.5.2 有快速确认的顺序检测	50
2.5.3 延迟确认顺序检测	51
2.5.4 顺序检测的能量和时间要求	51
2.6 恒虚警率检测	52
2.6.1 单元平均的 CFAR	52
2.6.2 双参数 CFAR	54
2.6.3 时间平均 CFAR	55
2.6.4 非参量 CFAR	55
2.7 有效可检测性因子	55
参考文献	56
附录 2A: 关于目标检测的习题	58
附录 2B: 提供的 Mathcad 工具	60
附录 2C: 习题的解	60

第3章 目标和干扰	61
3.1 雷达横截面积的定义	61
3.1.1 等效球体	61
3.1.2 等效天线	62
3.2 简单物体的雷达横截面积	63
3.2.1 峰值 RCS 和波瓣结构	63
3.2.2 RCS 与波长和姿态角的关系	63
3.2.3 谐振现象	65
3.2.4 RCS 的极化依赖性	66
3.3 复杂目标的 RCS	67
3.3.1 Swerling 目标模型	68
3.3.2 通用目标模型	70
3.3.3 目标谱和相关时间	70
3.3.4 相关频率	71
3.4 横截面积的空间分布	71
3.4.1 目标闪烁	71
3.4.2 二元目标	72
3.4.3 角度、距离和多普勒闪烁	73
3.4.4 闪烁谱	74
3.5 双基地横截面积	75
3.5.1 前向散射 RCS	75
3.5.2 双基地增强的范围	75
3.6 雷达杂波	76
3.6.1 面杂波	77
3.6.2 海杂波	78
3.6.3 地杂波	79
3.6.4 面杂波幅度分布	81
3.6.5 面杂波的速度谱	82
3.6.6 降雨杂波	84
3.6.7 箔条	85
3.6.8 体杂波的空间和速度范围	85
3.6.9 体杂波的幅度分布	87
3.6.10 离散杂波源	87
3.7 干扰	88
3.7.1 噪声干扰	88
3.7.2 欺骗干扰	89
3.7.3 诱饵	89
参考文献	90
附录 3A: 关于目标和干扰的习题	91

附录 3B: 提供的 Mathcad 工具	94
附录 3C: 习题的解	95
第 4 章 雷达天线	96
4.1 四个坐标上的雷达响应	96
4.1.1 雷达分辨力	96
4.1.2 可分离角度响应	97
4.1.3 天线方向图的互易性	99
4.2 天线和阵列	99
4.2.1 均匀照射孔径	99
4.2.2 锥削式孔径照射	100
4.2.3 椭圆形孔径和圆形孔径	103
4.2.4 天线副瓣	103
4.2.5 反射面天线	104
4.2.6 透镜天线	108
4.2.7 平面阵列天线	108
4.3 相控阵	109
4.3.1 单元和阵列因子	110
4.3.2 相扫	110
4.3.3 频率扫描	112
4.3.4 稀疏阵列	113
4.3.5 移相器	114
4.3.6 阵列馈电系统	115
4.3.7 放大器阵列	117
4.3.8 波束形成矩阵	118
4.3.9 相位和幅度误差效应	119
4.3.10 阵列带宽	121
4.4 超低副瓣天线	123
4.4.1 定义	123
4.4.2 扫描的超低副瓣天线系统设计	124
4.4.3 超低副瓣反射面天线	126
4.5 多波束天线	128
4.5.1 堆积波束系统	128
4.5.2 单脉冲天线	130
4.5.3 焦平面阵列馈源	133
4.5.4 数字波束形成	134
参考文献	135
附录 4A: 关于雷达天线的习题	135
附录 4B: 提供的 Mathcad 工具	138
附录 4C: 习题的解	140

第5章 波形和信号处理	141
5.1 模糊函数	141
5.1.1 匹配滤波器的实现	142
5.1.2 矩形脉冲的响应	143
5.1.3 简单脉冲的分辨力特性	145
5.2 脉冲压缩	146
5.2.1 相位编码脉冲压缩	147
5.2.2 线性调频脉冲压缩	148
5.2.3 非线性调频脉冲波形	151
5.2.4 脉冲压缩波形的多普勒容差	154
5.3 动目标显示	157
5.3.1 脉冲串的频谱	157
5.3.2 脉冲串的模糊函数	159
5.3.3 最佳 MTI 滤波器	160
5.3.4 实用 MTI 滤波器的实现	161
5.3.5 参差 PRF 和 PRF 分集 MTI	163
5.3.6 带脉冲振荡发射机的 MTI	163
5.3.7 非相干 MTI	165
5.3.8 区域 MTI	165
5.3.9 相干 MTI 的性能	165
5.3.10 非相干 MTI 的性能	170
5.3.11 存在移动杂波时的 MTI	170
5.3.12 MTI 系统的损耗	170
5.3.13 MTI 系统中的可检测性因子	172
5.4 脉冲多普勒	172
5.4.1 定义	172
5.4.2 低 -PRF PD 雷达	174
5.4.3 中 -PRF PD 雷达	176
5.4.4 高 -PRF PD 雷达	179
5.4.5 振荡器对 PD 雷达性能的影响	180
5.4.6 滤波器副瓣对 PD 雷达性能的影响	183
5.4.7 PD 雷达中的损耗因子	184
5.4.8 PD 雷达的探测距离	186
参考文献	187
附录 5A: 关于波形和信号处理的习题	188
附录 5B: 提供的 Mathcad 工具	191
附录 5C: 习题的解	194
第6章 雷达传播	195
6.1 大气衰减	195

6.1.1	晴朗的大气	195
6.1.2	气象衰减	199
6.1.3	穿过潮湿天线罩的衰减	201
6.1.4	电离层衰减	201
6.1.5	箔条的衰减	201
6.1.6	预测衰减时探测距离的 Blake 方法	202
6.1.7	大气噪声温度	202
6.1.8	大气透镜损耗	203
6.2	表面反射效应	204
6.2.1	传播因子	204
6.2.2	表面反射几何图	204
6.2.3	反射系数	206
6.2.4	粗糙表面	208
6.2.5	植被因子	210
6.2.6	方向图传播因子对雷达探测范围的影响	210
6.3	绕射	211
6.3.1	光滑球面绕射	211
6.3.2	从绕射区到干涉区的过渡	212
6.3.3	刀锋绕射	213
6.3.4	粗糙表面效应	215
6.4	大气折射	216
6.4.1	指数形式基准大气层	217
6.4.2	仰角和距离偏移误差	218
6.4.3	偏移误差的校正	220
6.4.4	对流层起伏	220
6.4.5	大气波导	221
6.4.6	电离层绕射	221
6.4.7	法拉第旋转	222
	参考文献	224
	附录 6A: 关于雷达传播的习题	225
	附录 6B: 提供的 Mathcad 工具	226
	附录 6C: 习题的解	227
第 7 章	雷达监视	228
7.1	监视雷达基础	228
7.2	两坐标对空监视雷达	230
7.2.1	两坐标搜索问题的定义	230
7.2.2	驻留时间与波束宽度	232
7.2.3	孔径面积的限制	233

7.2.4	两坐标监视的最小平均功率	233
7.2.5	功率与孔径两者之间经济上的折中方案	233
7.2.6	两坐标雷达中传播与杂波上的考虑	233
7.2.7	中程两坐标空中交通管制雷达的实例	235
7.3	堆积波束三坐标监视雷达	237
7.3.1	三坐标搜索问题的定义	237
7.3.2	驻留时间与波束宽度	238
7.3.3	孔径面积与平均功率	238
7.3.4	堆积波束三坐标雷达中杂波方面的考虑	239
7.3.5	远程堆积波束三坐标雷达的实例	239
7.3.6	脉冲内扫描的三坐标雷达	241
7.4	波束扫描的三坐标监视雷达	241
7.4.1	扫描的波束驻留时间与波束宽度	242
7.4.2	孔径面积与平均功率	243
7.4.3	波束扫描三坐标雷达杂波上的考虑	244
7.4.4	波束扫描三坐标雷达的实例	244
7.4.5	多功能雷达的搜索模式	245
7.5	混合型三坐标监视雷达系统	247
7.5.1	多仰角扇区中的堆积波束	247
7.5.2	多重扫描波束	247
7.6	地平线扫描	248
7.6.1	帧时间与仰角波束宽度	248
7.6.2	典型的水平线扫描问题	248
7.7	海用导航雷达	250
7.7.1	搜索空域的定义	250
7.7.2	驻留时间与方位波束宽度	250
7.7.3	海用导航雷达的雷达方程	250
7.7.4	远程海用导航雷达的实例	251
7.8	表面监视雷达	252
7.8.1	战场监视	252
7.8.2	具有实孔径的机载表面监视	253
7.8.3	合成孔径雷达的机载表面监视	255
7.8.4	空对面目标瞄准	255
7.9	利用监视雷达数据进行跟踪	256
7.9.1	目标报告误差	256
7.9.2	边扫描边跟踪滤波器	257
7.9.3	跟踪的起始与保持	259
7.10	监视雷达的 ECM 与 ECCM	260
7.10.1	监视雷达的噪声干扰	261

7.10.2 在噪声干扰中监视雷达的探测距离	262
7.10.3 对监视雷达的欺骗干扰	265
7.10.4 监视雷达采用的 ECCM 措施	266
7.10.5 监视雷达 ECCM 汇总	271
参考文献	271
附录 7A: 关于监视雷达的习题	273
附录 7B: 提供的 Mathcad 工具	278
附录 7C: 习题的解	280
第 8 章 雷达跟踪和测量	281
8.1 测量的基本原理	281
8.1.1 基本测量过程	281
8.1.2 测量灵敏度	282
8.1.3 噪声环境的最佳估算器	283
8.2 角度测量	284
8.2.1 顺序和同时波束控制	284
8.2.2 圆锥扫描	285
8.2.3 扇区扫描	287
8.2.4 单脉冲雷达	288
8.2.5 单脉冲信号处理	293
8.3 距离跟踪和测量	301
8.3.1 对单个脉冲的最佳估算器	301
8.3.2 对单个脉冲失配的估算器	303
8.3.3 脉冲串测距	304
8.3.4 数字信号处理机中的距离测量	306
8.4 多普勒测量	307
8.4.1 对单个脉冲或采样的多普勒测量	307
8.4.2 对脉冲串的多普勒测量	309
8.4.3 解多普勒模糊	309
8.5 雷达误差分析	310
8.5.1 测量误差的分类	310
8.5.2 动态滞后误差	312
8.5.3 多路径反射误差	314
8.5.4 杂波引起的误差	323
8.5.5 雷达误差预算	324
8.6 跟踪雷达的目标截获	325
8.7 多功能阵列雷达	328
8.8 跟踪雷达的 ECM 和 ECCM	330
8.8.1 针对跟踪雷达的 ECM 的目标	330

8.8.2 防止截获	331
8.8.3 延迟截获	331
8.8.4 距离和多普勒数据的拒绝	332
8.8.5 引入距离和多普勒误差或破坏锁定	333
8.8.6 引入角度上大的误差或破坏锁定	333
参考文献	337
附录 8A: 关于跟踪雷达的习题	339
附录 8B: 提供的 Mathcad 工具	343
附录 8C: 习题的解	344
第 9 章 雷达损耗预算	345
9.1 损耗分类	345
9.1.1 雷达 - 目标系统中损耗的位置	345
9.1.2 恒定损耗、与目标有关的损耗和统计损耗	346
9.2 射频馈线损耗	346
9.2.1 发射机馈线损耗	346
9.2.2 接收馈线损耗	348
9.3 传播损耗	348
9.3.1 大气和气象衰减	348
9.3.2 不是衰减的其他损耗	349
9.4 天线损耗	350
9.4.1 天线设计中固有的损耗	350
9.4.2 由于实际天线实现所引起的损耗	352
9.4.3 由于天线工作引起的损耗	355
9.4.4 总天线损耗	357
9.5 接收机 / 处理机损耗	357
9.5.1 确定性损耗	357
9.5.2 统计损耗	361
9.6 损耗在雷达方程中的分配	366
9.6.1 天线损耗	366
9.6.2 噪声温度	366
9.6.3 方向图 - 传播因子	367
9.6.4 可检测性因子	367
9.6.5 信号处理损耗	367
9.6.6 雷达方程中的独立损耗项	367
9.6.7 损耗预算程序	367
9.7 典型损耗预算	368
9.7.1 机械扫描二维监视雷达的损耗预算	368
9.7.2 机械扫描单脉冲跟踪雷达的损耗预算	369

9.7.3 空馈多功能阵列雷达的损耗预算	370
9.7.4 总结	372
参考文献	372
附录 9A: 关于损耗预算的习题	373
附录 9B: 提供的 Mathcad 工具	374
附录 9C: 习题的解	376
附录 A 符号表	377
附录 B 缩略语和缩写	396

第1章 雷达距离方程

雷达是通过发射电磁信号,接收来自其威力覆盖范围内目标的回波,并从回波信号中提取位置和其他信息,以用于探测、定位以及有时进行目标识别的电磁系统^[1.854页]。该定义是原始术语“无线电探测和测距”的逻辑扩展。由于雷达技术及其应用已有70多年的发展,所以对其性能的要求和预期已超出只是探测的范畴,并变得更加苛刻。雷达系统分析现在必须对各种复杂环境中各种目标类型提供所有雷达功能中性能的“量化”估计。本书的目的是对这些分析中所采用的方法和模型进行概述。

本章将对雷达的基本功能和分系统,以及建立可探测到目标的区域的距离方程进行讨论。后续章节将考虑噪声特性和进入接收机的其他干扰分量,执行特定功能所要求的目标信号与该干扰的比,以及在真实雷达工作环境中获得该信号干扰比的手段。

1.1 雷达基础

1.1.1 基本功能

雷达的两个最基本的功能固有地体现在缩略语中:探测和测距。角度测量也是多数雷达的一个基本功能,而多普勒速度通常直接作为第四个基本量来测量。从背景噪声和杂波中分辨出所希望的目标是探测和测量的先决条件,而对于测绘和雷达成像来说,对表面特点的分辨是必不可少的。雷达分辨单元是一个受天线波束宽度、处理后脉冲的宽度以及接收滤波器限制的四维空域。在每个分辨单元或每个相关单元组内,要决定目标是否出现,并且当目标出现时,要将其位置内插到分辨单元尺寸的几分之几以内。

典型脉冲式雷达的框图如图1.1所示。雷达各方框被任意分配给7个分系统,以对应于工程领域惯用的设计专业。雷达的工作由位于同步器或相关激励器块内的主时钟控制。同步器产生脉冲,脉冲启动雷达发射、接收机门或采样选通、信号处理功能和显示器扫描。当被同步器请求时,调制器为射频放大器提供一个高电压脉冲,同时有一个来自激励器的射频驱动信号。得到的高功率射频脉冲通过传输线或波导传送到双工器,双工器将该传输线与天线相连,以便将高功率射频脉冲辐射到空间。天线形成一个波束,以机械方式控制到天线孔径前的某一特定方向。

从目标反射后,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波器将脉冲波形恢复,并对该波形进行显示或用于进一步的视频处理。

针对具体的雷达应用,图1.1中的框图有许多种变化。例如,图1.2给出了由计算机控制的现代雷达系统的框图,该系统利用了无源相控阵。雷达同步器现在是一个专门的数字硬件单元,它接受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