



“十二五”国家重点图书
电子与信息工程系列

RADAR SIGNALS: THEORY AND APPLICATION

雷达信号理论与应用

(基础篇)

● 位寅生 编著

● 许荣庆 主审



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



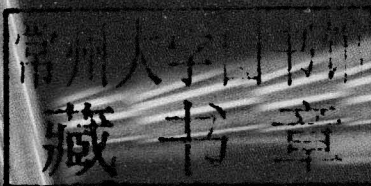
“十二五”国家重点图书
电子与信息工程系列

RADAR SIGNALS: THEORY AND APPLICATION

雷达信号理论与应用

(基础篇)

● 位寅生 编著
● 许荣庆 主审



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

雷达信号理论是深入学习雷达信号处理以及雷达系统分析与设计的重要基础课程,其主要内容为:雷达信号的分析、雷达信号的最优处理以及雷达信号的最优设计。本书作为雷达信号理论与应用丛书的基础篇,主要介绍雷达信号分析的重要工具——模糊函数理论和雷达信号的最优处理方法——匹配滤波理论;在应用方面,重点介绍如何运用模糊函数对雷达信号进行分析,以及最优处理方法在实际雷达信号中如何应用。

本书分为 11 章。前 5 章介绍雷达信号分析的基础理论,后 6 章介绍基本雷达信号分析与处理方法。第 1 章是本书涉及的信号分析基础;第 2 章介绍雷达信号的最优处理——匹配滤波;第 3 章介绍雷达分辨的理论以及分辨和模糊函数的关系;第 4 章讲述模糊函数的基本理论;第 5 章介绍雷达理论估值误差与模糊函数的关系;第 6~11 章,分别介绍了简单脉冲信号、相参脉冲串信号、线性调频脉冲信号、非线性调频脉冲信号、频率编码信号、相位编码信号。

本书内容基础、翔实,层次分明,概念解析清楚,强调基础理论和实际应用的结合,非常适合自学。本书可作为电子工程专业高年级本科生以及研究生的《雷达信号理论》课程的教材,也可作为相关专业科技人员的参考书。

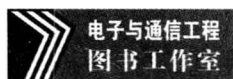
图书在版编目(CIP)数据

雷达信号理论与应用/位寅生编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.6

ISBN 978-7-5603-3295-6

I. ①雷… II. ①位… III. ①雷达信号
IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 104142 号



责任编辑 许雅莹

封面设计 刘洪涛

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 16.25 字数 380 千字

版 次 2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3295-6

定 价 32.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

“十二五”国家重点图书 电子与信息工程系列

编 审 委 员 会

顾 问 张乃通

主 任 顾学迈

副 主 任 张 晔

秘 书 长 赵雅琴

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 钢 邓维波 任广辉 沙学军

张钧萍 吴芝路 吴 群 谷延锋

孟维晓 赵洪林 赵雅琴 姜义成

郭 庆 宿富林 谢俊好 冀振元

序

FOREWORD

教材建设一直是高校教学建设和教学改革的主要内容之一。针对目前高校电子与信息工程教材存在的基础课教材偏重数学理论,而数学模型和物理模型脱节,专业课教材对最新知识增长点和研究成果跟踪较少等问题,及创新型人才的培养目标和各学科、专业课程建设全面需求,哈尔滨工业大学出版社与哈尔滨工业大学电子与信息工程学院的各位老师策划出版了电子与信息工程系列精品教材。

该系列教材是以“寓军于民,军民并举”为需求前提,以信息与通信工程学科发展为背景,以电子线路和信号处理知识为平台,以培养基础理论扎实、实践动手能力强的创新型人才为主线,将基础理论、电信技术实际发展趋势、相关科研开发的实际经验密切结合,注重理论联系实际,将学科前沿技术渗透其中,反映电子信息领域最新知识增长点和研究成果,因材施教,重点加强学生的理论基础水平及分析问题、解决问题的能力。

本系列教材具有以下特色:

(1) **强调平台化完整的知识体系。**该系列教材涵盖电子与信息工程专业技术理论基础课程,对现有课程及教学体系不断优化,形成以电子线路、信号处理、电波传播为平台课程,与专业应用课程的四个知识脉络有机结合,构成了一个通识教育和专业教育的完整教学课程体系。

(2) **物理模型和数学模型有机结合。**该系列教材侧重在经典理论与技术的基础上,将实际工程实践中的物理系统模型和算法理论模型紧密结合,加强物理概念和物理模型的建立、分析、应用,在此基础上总结牵引出相应的数学模型,以加强学生对算法理论的理解,提高实践应用能力。

(3) **宽口径培养需求与专业特色兼备。**结合多年来有关科研项目的科研经验及丰硕成果,以及紧缺专业教学中的丰富经验,在专业课教材编写过程

中,在兼顾电子与信息工程毕业生宽口径培养需求的基础上,突出军民兼用特色,在满足一般重点院校相关专业理论技术需求的基础上,也满足军民并举特色的要求。

电子与信息工程系列教材是哈尔滨工业大学多年来从事教学科研工作的各位教授、专家们集体智慧的结晶,也是他们长期教学经验、工作成果的总结与展示。同时该系列教材的出版也得到了兄弟院校的支持,提出了许多建设性的意见。

我相信:这套教材的出版,对于推动电子与信息工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到重要推动作用。

哈尔滨工业大学教授 张乃通
中国工程院院士



2010 年 11 月于哈工大

前言

PREFACE

雷达信号理论是在二战前后发展起来的,它是雷达理论的一个重要分支。雷达信号作为雷达系统的核心,始终围绕着两个问题开展研究:其一,雷达发射什么样的信号才能最佳地与电磁环境相匹配,从而更有利于探测到目标;其二,雷达信号如何进行处理才能最有利于检测到目标。因此,最优信号处理和最优波形选择与设计在雷达信号理论中占有重要的地位,而雷达信号分析方法是研究二者的重要基础。

到目前为止,国内外出现了大量有关雷达信号分析与设计的文献,但作为全面系统的讨论雷达信号的专著并不多。其中,英文版有两本重要的专著:一本是 C. E Cook 和 Bernfeld 所著的《Radar Signals: An Introduction to Theory and Application》,由 Archhouse 在 1967 年出版,这本书可以说是最经典的雷达信号理论专著之一;第二本书是 Nadav Levanon 和 Eli Mozeson 合著的《Radar Signals》,由 John Wiley & Sons 在 2004 年出版,这本书内容十分丰富,作者把雷达信号最新的理论研究成果展现给读者,还特别提供了 MATLAB 代码用于仿真和分析。此外,2008 年 Bassem R. 编著的《Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB》,也是非常有特色的有关雷达信号的参考书。

国内专门介绍雷达信号的书籍主要有两本,一本是张直中院士编著的《雷达信号的选择与处理》;另一本是林茂庸和柯有安编著的《雷达信号理论》,这两本书是本书作者在教学当中一直使用的主要参考书,也是很多科技人员学习雷达信号的启蒙教材,这两本书为雷达信号理论知识的传播作出了重要的贡献。

我在8年的《雷达信号理论与应用》研究生课程教学当中,深感雷达信号理论知识的丰富和庞杂,一些概念和理论知识尽管数学表达式比较简单,但由于初学者对概念的物理特性不了解,因此难以掌握和理解。于是萌生出一种编写一本理论与应用紧密结合并适合初学者的教材的想法。最初的想法是编写一本能够涵盖最新雷达信号理论、复杂现代雷达信号分析与设计的书,但最终还是确定编写丛书为好,丛书将分成基础篇、复杂雷达信号篇以及现代雷达波形设计篇,本书属于基础篇。

本书适合作为电子工程专业高年级本科生和研究生教材。全书内容力求简单易懂,注重基础理论和知识衔接性,加强概念的内涵和外延分析与理解,对基础理论和基本方法的实际应用过程分析详尽,力求读者能做到理论扎实,应用过程和方法清晰。为便于学生掌握雷达信号的内容,根据实用性来安排本书的体系结构,编写本书时,还考虑到我校长期使用林茂庸老师的《雷达信号理论》作为主要参考书,课件内容上采用的都是此书的符号,因此本书内容上引用和延续了这本书部分内容,在书中的相应章节已一并指出。

雷达信号理论及其有关应用问题,特别是现代雷达信号波形设计仍在迅速发展,本书力求将雷达信号最基础的内容介绍给读者,便于读者今后深入学习雷达信号的理论。

哈尔滨工业大学电子与信息工程学院10级、11级部分研究生代表,对本书的试用稿进行了阅读,提出了许多宝贵意见,在此,表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中难多存在疏漏和不足之处,希望读者批评指正。

作 者

2011年5月于哈尔滨

目录

CONTENTS

绪论	1
第 1 章 雷达信号的分析基础	4
1.1 信号的复数表示	4
1.1.1 实信号的频谱	4
1.1.2 实信号的复数表示	5
1.1.3 窄带雷达信号的定义	9
1.1.4 窄带信号的解析表示	10
1.1.5 窄带信号的带通滤波	12
1.1.6 随机信号的复数表示	14
1.2 点目标	16
1.2.1 点目标定义	16
1.2.2 理想点目标	16
1.3 多普勒目标	16
1.3.1 目标多普勒频率	16
1.3.2 点运动目标回波	20
1.4 雷达波形参量	21
1.4.1 波形参量的矩表示	21
1.4.2 信号的不确定关系	25
第 2 章 雷达信号的最优处理	27
2.1 白噪声下的最优处理	27
2.1.1 回波信号理想模型	28
2.1.2 线性滤波器的输出	29
2.1.3 最大输出信噪比准则	31
2.1.4 最优线性滤波器求解	31
2.1.5 匹配滤波器特性分析	35
2.2 色噪声下最优线性处理	37

2.2.1 线性滤波器的输出	37
2.2.2 最优滤波器的求解	38
2.2.3 滤波器的级联形式	39
2.3 匹配滤波器的实际应用	40
2.3.1 全距离的匹配处理	40
2.3.2 动目标的匹配处理	42
2.3.3 二维匹配处理过程	43
2.3.4 离散匹配滤波器组	44
第3章 雷达分辨与模糊函数	47
3.1 雷达分辨的基础知识	47
3.1.1 雷达分辨的定义	47
3.1.2 雷达分辨的度量	49
3.2 一维分辨与模糊函数	50
3.2.1 距离的分辨性能	50
3.2.2 速度的分辨性能	55
3.3 二维分辨与模糊函数	58
3.3.1 二维的分辨问题	58
3.3.2 二维的分辨性能	59
第4章 模糊函数的基本理论	66
4.1 模糊函数的形式	66
4.1.1 坐标的方向规定	66
4.1.2 卷积和频域形式	68
4.1.3 互模糊函数定义	69
4.2 模糊函数的理解	69
4.2.1 等价的匹配输出	69
4.2.2 模糊函数的剖面	70
4.3 模糊函数的性质	72
4.3.1 函数的内在性质	72
4.3.2 函数的变换性质	75
4.3.3 函数的导数性质	78
第5章 估值误差与模糊函数	81
5.1 雷达误差概述	81
5.1.1 雷达误差与来源	81
5.1.2 估计参数时假设	82

5.2 时延估值误差	82
5.2.1 无噪声的情况	83
5.2.2 有噪声的情况	84
5.3 频移估值误差	86
5.3.1 无噪声的情况	86
5.3.2 有噪声的情况	87
5.4 联合估值误差	88
第6章 简单脉冲与脉压信号	90
6.1 简单脉冲信号	90
6.1.1 矩形脉冲的波形参数	90
6.1.2 矩形脉冲的模糊函数	92
6.1.3 矩形脉冲的分辨性能	93
6.1.4 高斯脉冲信号的分析	98
6.2 脉冲压缩信号	100
6.2.1 简单脉冲信号局限性	100
6.2.2 脉冲压缩信号的提出	100
6.2.3 脉压信号产生的途径	101
6.2.4 脉冲压缩实现的原理	103
6.3 雷达信号的分类	104
第7章 单载频相参脉冲串信号	108
7.1 信号相参性的解释	108
7.2 脉冲串信号的频谱	110
7.2.1 直接推导法	110
7.2.2 间接推导法	110
7.3 相参脉冲串信号的模糊函数	112
7.4 相参脉冲串信号的分辨性能	114
7.4.1 模糊函数的剖面分析	114
7.4.2 速度模糊函数与频谱	117
7.4.3 模糊函数的体积分布	117
7.4.4 二维分辨与测量模糊	119
7.5 匹配滤波器的二维结构	120
7.5.1 静止目标的匹配滤波器	120
7.5.2 运动目标的匹配滤波器	122
7.6 相参脉冲串信号的处理	122
7.6.1 脉间的距离合成处理	122
7.6.2 运动目标的匹配处理	123

7.6.3 二维处理的快速算法	125
7.7 加权的相参脉冲串信号	126
7.7.1 信号的频谱	127
7.7.2 互模糊函数	127
7.8 参差周期的相参脉冲串信号	129
第8章 线性调频脉冲信号	131
8.1 线性调频脉冲信号的波形参数	131
8.2 线性调频脉冲信号的频谱分析	134
8.2.1 傅里叶分析	134
8.2.2 相位驻留法	137
8.3 线性调频脉冲信号的模糊函数	138
8.4 线性调频脉冲信号的分辨性能	140
8.4.1 模糊函数的剖面图	140
8.4.2 距离分辨率的改善	141
8.4.3 距离-多普勒的耦合	142
8.5 线性调频脉冲信号的理论精度	145
8.5.1 距离-多普勒的一维精度	145
8.5.2 距离-多普勒的联合精度	146
8.6 线性调频脉冲信号的脉冲压缩	146
8.6.1 运动目标的脉冲压缩	146
8.6.2 脉冲压缩的性能分析	149
8.6.3 多普勒失配损失分析	151
8.6.4 脉压输出的旁瓣抑制	152
8.7 线性调频信号的去斜率处理技术	156
8.7.1 单个线性调频脉冲的回波分析	156
8.7.2 V型线性调频脉冲的信号分析	159
8.7.3 线性调频连续波信号的二维处理	162
8.8 线性调频脉压系统的失真分析	164
8.8.1 成对回波理论	164
8.8.2 传统系统失真分析	165
8.8.3 输入信号失真分析	167
第9章 非线性调频脉冲信号	173
9.1 非线性调频信号概述	173
9.2 非线性调频信号设计	174
9.2.1 非线性调频信号实现原理	174
9.2.2 利用窗函数产生调频函数	176

9.2.3 利用 S 信号产生调频函数	178
9.3 非线性调频脉压性能分析	179
第 10 章 频率编码信号	181
10.1 时频编码信号	181
10.2 频率步进信号分析	182
10.2.1 频率步进信号的形式	183
10.2.2 频率步进信号的模糊函数	184
10.2.3 频率步进信号的回波分析	187
10.2.4 目标运动对距离像的影响	189
10.2.5 目标运动补偿的精度要求	194
10.2.6 全距离的目标距离像合成	195
10.3 Costas 编码信号	198
10.3.1 Costas 序列的定义	199
10.3.2 Costas 序列的构造	200
10.3.3 编码信号模糊函数	202
10.3.4 Costas 编码信号中心模糊带性质	203
10.3.5 Costas 编码信号旁瓣模糊带性质	205
第 11 章 相位编码信号	209
11.1 二相编码信号	209
11.1.1 二相编码信号的频谱	209
11.1.2 二相编码信号的模糊函数	212
11.1.3 二元伪随机序列	215
11.2 多相编码信号	221
11.2.1 多相巴克码	222
11.2.2 线性调频类编码	222
11.2.3 赫夫曼编码	226
11.3 互补类编码信号	227
11.3.1 互补编码信号	227
11.3.2 完全互补编码	233
11.3.3 正交互补编码	234
11.4 相位编码信号的处理	236
11.4.1 相位编码信号的匹配处理	236
11.4.2 相位编码信号的旁瓣抑制	239
11.4.3 相位编码信号的多普勒容限	243
参考文献	245

绪 论

作为雷达信号理论的初学者,可能最关心的是以下几个问题:

什么是雷达信号,与其他信号的区别在哪里?雷达信号有什么用,能为我们提供哪些信息?什么是最优的雷达信号,怎样才能满足分辨和精度的要求?接收的雷达回波基本的处理过程是什么?最基础的雷达信号有哪些?此外,作为教材雷达信号理论课程和其他课程是什么关系,怎么衔接?

《雷达信号理论与应用(基础篇)》所要介绍的内容涵盖了上述的问题:

- (1) 雷达信号的分析工具 —— 模糊函数;
- (2) 雷达信号的最优处理 —— 匹配滤波;
- (3) 基本的雷达信号的分析 and 处理。

1. 雷达信号是什么?

雷达信号作为一种电信号,与自然界的其他信号,如振动信号、图像信号、通信信号、语音信号,物理上并无本质的区别,都是需要调制信息或者提取信息。信号只是一个载体,最终是要把信号中有用信息提取加以处理。雷达信号有自身的特点,以我们最熟悉的通信信号——手机信号为例,来说明雷达信号的特点。

发射信号是否包含信息是雷达信号的一个明显特点,雷达信号发射时是不带有任何目标的信息,如距离、多普勒速度、角度、形状等是雷达信号照射在目标以后,由目标的这些特性对雷达信号进行调制的,载有目标信息的回波被雷达接收后,经过处理才能得到信息;而手机信号是通过把人的语音信号变成电信号,然后把电信号调制到载波上发射出去,被另一方解调接收得到电信号,然后再通过换能器把电信号转换成语音信号。

2. 雷达信号如何最优处理?

同通信信号相比,接收到有用的雷达回波信号是弱信噪比信号,有用的信号通常淹没在噪声当中,有些情况下回波信号的信噪比甚至是负的几十个分贝。这样,雷达信号在噪声背景中怎样才能更好地检测到目标,自然是雷达信号研究的重点,人们不禁要关心,雷达信号回波应该怎样处理才能够最优,最优的准则是什么?

从物理角度看,最优的准则自然是信噪比最大准则。诺思(North)在1943年提出了匹配滤波器理论,见参考文献[1],回答了在平稳白噪声背景下,什么是雷达信号的最优处理,大大推动了雷达检测能力的提高。此后,证实了按最大信噪比准则导出的匹配滤波器和在高噪声下对确知信号的最大似然比准则是等价的。劳森(Lawson)在1950年把匹配滤波器理论系统地载入其专著《Threshold Signals》当中。随着检测理论研究的不断展开,为了解决杂波中的信



号检测问题,乌尔柯维兹(Urkowitz)把匹配滤波器理论推广到色噪声的场合,提出“白化滤波器”和“逆滤波器”的概念。此后,曼那斯(Manasse)研究了同时存在白噪声和杂波干扰下的最佳滤波器,为抑制杂波波形优化问题打下了理论基础。

3. 如何分析雷达信号?

在解决雷达信号最优处理以后,人们更加关心雷达信号本身,雷达信号类型和参数究竟对雷达的性能有哪些影响?

1953年伍德沃德(Woodward)在其著作中提出了有名的雷达模糊原理,见参考文献[2],他指出了在白噪声背景下,能量相同的雷达回波信号采用匹配处理输出的信噪比相同,也就是检测能力与波形形式无关。进而,伍德沃德定义了模糊函数及分辨常数等新概念,奠定了雷达分辨理论的基础,并首次触及波形设计问题,它指出距离分辨力和测量精度取决于信号的带宽而非时宽,从而大大推动了雷达信号理论的发展。模糊函数作为雷达信号分析的最基本的“工具”为我们提供了一个分析雷达信号固有特性的基本方法,至今仍然沿用,成为雷达信号分析的经典理论工具。

4. 雷达信号有哪些种?

二战以后,在实现了雷达信号最优处理的前提下,典型的脉冲雷达在同时提高发现能力、距离和速度测量精度以及分辨力方面遇到了不可克服的矛盾,为了解决这个问题,出现了脉压信号,并且发展至今已经成为绝大多数现代雷达采用的信号形式。最早获得实际应用的有线性调频脉冲压缩信号、二相编码信号,以后相继出现相参脉冲串信号,如非线性调频、多相相位编码等大时宽带宽信号。随着雷达技术的发展,人们对复杂信号的研究更加重视,如脉间或脉组频率跳变脉冲串、频率步进信号、Costas编码信号、参差重复周期信号、脉内加脉间复合调制信号等。

5. 如何设计雷达信号?

由于雷达发射波形不仅决定了信号处理方法,而且直接影响系统的分辨力、测量精度以及抑制杂波能力等潜在性能。于是,波形设计就成了雷达系统最佳综合的重要内容,逐渐形成现代雷达理论的重要分支。最初人们希望找到一种“理想”的波形,以适应各种不同的目标环境和工作要求,很快就发现这种努力是徒劳的。雷达波形设计外一直沿着两种不同的途径进行研究,一种是萨斯曼(Sussman)等人所走的波形综合的道路,通过模糊函数最优综合的方法,得到所需要的最优波形。遗憾的是这方面不仅遇到了数学上的困难,而且综合得到的复杂调制波形也往往是技术上难以实现的信号。不过一维模糊函数的综合借助于相位逗留原理获得了较好的解决。里海涅克(Rihacaek)提出另外一种“简便的波形选择途径”,即根据目标环境图和信号模糊图匹配的原则,选择合适的信号类型,进而兼顾技术实现的难易程度,选择合适的信号形式和波形参数。近代先进的数字化多功能雷达大多采用多种发射信号,以适应不同的战术用途。随着电子战的发展,现代雷达面临的目标环境不仅复杂多端,而且是瞬息万变的,所以波形自适应是个值得重视的发展方向。

6. 雷达信号在雷达系统中处于什么地位?

雷达信号本身决定了雷达系统的固有分辨性能,贯穿在雷达系统的各个部分,从雷达



信号产生,到雷达信号发射,从本振形式,中频信号的相参检波,到信号的匹配滤波器设计,都是和雷达信号及其参数密切相关的,可以说雷达信号是雷达系统的核心。从图 1 可以直观看出雷达信号与雷达系统的关系。

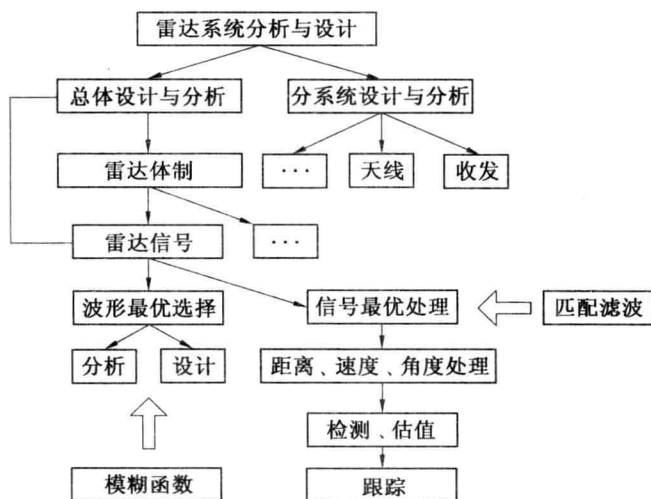


图 1 雷达信号与雷达系统

7. 雷达信号发展趋势

雷达工作者希望一个最佳的雷达信号具有以下特点：

- ① 希望雷达信号回波中能包含更丰富的目标信息；
- ② 寻求易于发射和接收处理的雷达信号；
- ③ 寻求具有杂波和干扰抑制能力的雷达信号；
- ④ 寻求容易探测目标而不容易被侦查到的雷达信号；
- ⑤ 能够感知信号环境,并能够最优的适应环境改变雷达信号的参数。

要完成上述的目标并不是一件容易的事情,对于雷达信号研究者来说,不仅要具有充实的雷达信号理论,而且要熟悉雷达系统的性能和设计,这样才能设计出最优的雷达信号。本书试图引导读者迈出实现这些目标的第一步,作为一本基础教材,从掌握雷达信号分析开始,掌握基本的雷达信号,才能开始着手完成进一步的雷达信号设计任务。

综上所述,雷达信号理论发展过程中,形成了信号最优处理方法研究和最优波形的设计这两个重要的方向。它是对整个系统进行最优综合,是发展各种雷达新体制的理论基础,也是在实际雷达系统进行性能分析的理论指导,用以阐明实际雷达系统的合理性及改进的可能性。随着雷达信号理论的发展,雷达系统的威力、精度、分辨力以及反侦察、抗干扰能力必将得到进一步提高,雷达回波信号中所包含的有用信息必将得到更充分的利用。

雷达信号理论涉及面很广,内容十分丰富,本书试图起到一个导论的作用,在理论上着重介绍雷达信号分辨,围绕着最优处理——匹配滤波和模糊函数展开;在应用方面,以基本雷达信号为基础,着重展开如何分析雷达信号,如何对回波进行分析,提取雷达信号的基本信息等基本问题,为读者进一步掌握复杂雷达信号分析与设计提供必要的基础。

1.1 信号的复数表示

实际中的雷达信号都是实数信号,观测时间内是能量有限信号。但在雷达信号分析过程中,常把实数信号写成复数的形式,这样做的主要目的是数学上分析的方便。因此,有必要对雷达信号的复数表示加以介绍。本节首先从实信号及其频谱分析开始,通过分析实数信号频谱的对称性,以单频信号的矢量表示推广出任意实数信号的复数表示,即信号的解析表示。实现信号的复数表示有两种方法,即希尔伯特变换表示法和指数表示法。希尔伯特变换表示法是作为一种复解析信号的一种严格表示,而指数信号是在窄带信号条件下的一种近似的解析信号。

1.1.1 实信号的频谱

雷达发射信号不包含任何有关目标的信息,而只是信息的运载工具,有关目标的信息是在发射信号碰到目标并产生反射的过程中调制上去的,实际的雷达信号都是实数信号,通常我们关心雷达射频信号和基带信号。目前的相参雷达中,雷达信号的幅度、频率和相位均是已知的,本书中雷达实信号一般记作 $x(t)$,采用下角标区分发射和接收,标记 t 表示发射, r 表示接收。

雷达发射信号 $x_t(t)$ 可以认为是确定性信号,但雷达接收信号 $x_r(t)$ 则是回波信号与噪声干扰叠加而成的随机信号。雷达信号可以用时间的实函数 $x(t)$ 表示,称为实信号,其特点是具有有限的能量或有限的功率。

实函数 $x(t)$ 为功率有限信号,即在时间 T 内信号的平均功率 P 有限,记为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1.1)$$

实函数 $x(t)$ 为能量有限信号,即在信号的定义区间内的能量 E_s 有限,记为

$$E_s = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt < \infty \quad (1.2)$$

函数 $x(t)$ 是平方可积的,称能量有限信号为能量型信号。随机信号及周期性信号的特点是具有有限的功率而能量无限,称为功率型信号。通常,对于一个雷达信号,在有限观测时间内,看做能量信号或者是功率信号均可以,并不加以区分。雷达信号的时域表示只能表征其频率、幅度、相位三个参数,而关心信号频域的参数,如信号带宽、频谱分布特