

现代雷达目标检测 理论与方法

王首勇 万 洋 刘俊凯 等 著



科学出版社

014060294

TN951
20

现代雷达目标检测理论与方法

王首勇 万 洋 刘俊凯 等 著



科学出版社

北 京



北航

C1747498

TN951
20

内 容 简 介

现代雷达目标的多样性和探测环境的复杂化,使得应用新理论和新技术提高雷达的探测能力成为雷达技术中的重要研究方向。本书较为系统、深入地论述了现代雷达目标检测的主要理论和方法,总结了国际上这一领域的研究进展以及作者的研究成果。主要内容包括:目标检测的基础理论、目标与杂波的统计特性、复杂杂波背景下似然比检测、基于杂波抑制的目标检测、多杂波分布类型下的恒虚警率检测、基于粒子滤波的检测前跟踪技术、机动目标的检测前跟踪技术和基于动态规划的检测前跟踪技术等。

本书可作为从事雷达目标探测、雷达信号处理、雷达系统设计等相关领域的高校教师、高年级本科生、研究生以及科研和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达目标检测理论与方法/王首勇等著. —北京:科学出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-03-041454-0

I. ①现… II. ①王… III. ①雷达目标—目标检测 IV. ①TN951

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 167244 号

责任编辑:张艳芬 / 责任校对:张怡君
责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 8 月第一次印刷 印张:19

字数:370 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

由于现代雷达目标的多样性和探测环境的复杂化,传统的雷达体制和探测技术具有很大的局限性。为应对复杂的目标及环境,除了雷达体制发生了根本性改变外,对目标探测新理论和新技术的研究也在持续、广泛和深入地开展。典型的理论方法可归纳为两个方面。一是以概率统计理论为基础的检测方法,包括基于各类杂波分布模型建立的似然比检测方法;从抑制杂波、改善目标积累性能角度出发,形成的检测方法;把单帧积累和多帧积累相结合的检测前跟踪技术等。二是以新兴的数学理论为基础的检测方法,包括应用混沌、分形理论发展起来的检测方法;基于时频分析理论的目标检测方法;基于信息几何理论形成的检测方法等。由于涉及目标检测理论和方法的内容繁多,本书侧重于上述第一个方面的主要内容,概括为以下几个方面。

目标检测的基础理论:把与目标检测密切相关的基础理论进行了概括和归纳,包括参数估计和统计检测基础、最佳滤波理论和功率谱估计方法。对这部分内容的论述,其特点是尽量保持内容的系统性和完整性;注重各种方法的前提条件和基本思想,尽可能置于抽象空间描述、建模和分析,力求表述清晰,结论简洁;注重各种方法的联系、差别和统一,以助于理解其本质特征。

适应于复杂背景下的目标统计检测:

(1) 考虑到似然比检测是目标检测的理论基础和重要内容,因此,总结了以球不变随机过程为杂波分布模型,建立的各种似然比检测模型。

(2) 论述了从抑制杂波的非高斯特性和相关性角度,建立的检测模型。这些方法仅涉及观测数据的相关矩阵或功率谱,因此易于导出和实现。

(3) 传统的恒虚警率检测方法通常是针对一种杂波分布模型给出的,实际中有可能杂波分布类型也是变化的,因此论述了多杂波分布类型下的恒虚警率检测方法。

适应于弱小目标检测的检测前跟踪:检测前跟踪技术目前被认为是探测弱小目标较为有效的途径,它是一种联合检测与跟踪的技术,或是基于跟踪的检测技术。其基本思想是在单帧数据积累的基础上,进一步利用目标信号帧间的相关性,进行多帧积累后判断目标是否存在,并同时给出目标航迹。主要论述了目前广泛研究和应用的基于粒子滤波的检测前跟踪和基于动态规划的检测前跟踪方法,对这两类方法的理论模型和实现过程进行了详细描述,同时说明了实际应用中可能遇到的一些问题。

本书侧重于目标检测的基本理论模型和算法，未涉及具体的雷达体制和系统，论述的内容具有一定的通用性。

全书共 12 章。第 1 章由王首勇、万洋撰写；第 2~4 章由王首勇撰写；第 5 章由刘俊凯撰写；第 6 章由郑作虎、赵兴刚、杜鹏飞撰写；第 7 章由王首勇撰写；第 8 章由刘俊凯撰写；第 9~11 章由万洋、王首勇撰写；第 12 章由万洋、郑岱堃、王首勇撰写。杨荷英、江晶、朱晓波、刘重阳参加了本书部分撰写和编辑工作。王首勇对全书进行了整理。

本书得到国家自然科学基金项目(60872156, 60971116, 61179014, 61302193)的支持。

限于作者水平，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

王首勇

2014 年 5 月于武汉

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	4
第 2 章 参数估计和统计检测基础	6
2.1 引言	6
2.2 参数估计	6
2.2.1 估计量的性质	7
2.2.2 最小方差无偏估计量	8
2.2.3 最大似然估计量	9
2.2.4 矩估计量	11
2.2.5 随机参数的贝叶斯估计量	12
2.3 统计检测	22
2.3.1 检测准则	22
2.3.2 确定性信号检测	26
2.3.3 随机信号检测	31
2.3.4 具有未知参数的信号检测	33
参考文献	35
第 3 章 最佳滤波理论	36
3.1 引言	36
3.2 维纳滤波	36
3.2.1 概述	36
3.2.2 维纳滤波理论模型	37
3.2.3 FIR 维纳滤波器	38
3.3 最小二乘滤波	39
3.3.1 最小二乘滤波系数求解	39
3.3.2 基于 QR 分解求解 LS 滤波系数	46
3.3.3 基于奇异值分解求解 LS 滤波系数	48
3.4 Kalman 滤波	49
3.4.1 Kalman 滤波算法	50

3.4.2 扩展 Kalman 滤波	54
3.4.3 扩展 Kalman 滤波应用举例	56
3.5 匹配滤波和特征滤波	59
3.5.1 匹配滤波	60
3.5.2 特征滤波	63
参考文献	66
第 4 章 功率谱估计方法	67
4.1 引言	67
4.2 非参数功率谱估计方法	67
4.2.1 间接估计方法	68
4.2.2 直接估计方法	69
4.2.3 周期图的滤波器组实现	71
4.2.4 改进周期图方法	73
4.3 参数功率谱估计方法	75
4.3.1 功率谱模型	75
4.3.2 AR 模型参数估计	77
4.3.3 MA 模型参数估计	80
4.3.4 ARMA 模型参数估计	82
4.4 最小方差谱估计	84
4.4.1 时域滤波情况	85
4.4.2 空域滤波情况	87
4.4.3 MV 谱估计	89
4.5 基于矩阵特征值分解的频率估计	90
4.5.1 谐波模型	90
4.5.2 MUSIC 方法	91
4.5.3 实验结果	94
4.6 现代信号处理方法的特点分析	96
4.6.1 白噪声条件下的信号积累	96
4.6.2 色噪声条件下的信号积累	98
参考文献	99
第 5 章 目标与杂波统计特性	100
5.1 引言	100
5.2 现代雷达目标的特点	100
5.3 目标 RCS 统计模型	101
5.4 杂波统计特性	103

5.4.1 杂波散射强度	103
5.4.2 杂波一维概率分布模型	107
5.4.3 杂波的相关性模型	112
5.5 基于球不变随机过程的杂波联合分布模型	115
5.5.1 复 SIRV 的联合概率密度函数	115
5.5.2 基于正交双通道数据的 SIRV 的联合 PDF	117
5.5.3 K 分布和 Student-t 分布的联合 PDF	118
参考文献	118
第 6 章 非高斯相关杂波下似然比统计检测方法	120
6.1 引言	120
6.2 SIRP 杂波背景下似然比检测方法	120
6.2.1 未知参数条件下似然比检测	121
6.2.2 未知参数条件下似然比检测的近似形式	124
6.2.3 随机参数条件下的似然比检测	126
6.3 SIRP 杂波背景下局部最优检测	132
6.4 SIRP 杂波背景下基于粒子滤波的似然比检测	136
6.4.1 基本粒子滤波算法	136
6.4.2 基于粒子滤波的似然比检测模型	137
参考文献	139
第 7 章 基于杂波抑制的目标检测方法	141
7.1 引言	141
7.2 高斯相关杂波条件下的目标检测	141
7.2.1 基于匹配滤波的目标检测	141
7.2.2 基于特征滤波的目标检测	144
7.2.3 基于杂波 AR 模型建模的目标检测	145
7.3 非高斯相关杂波条件下的目标检测	146
7.3.1 基于分数低阶匹配滤波的目标检测	147
7.3.2 基于分数低阶特征滤波的目标检测	155
7.3.3 基于杂波 AR SaS 模型建模的目标检测	157
参考文献	159
第 8 章 多分布类型杂波背景下的 CFAR 检测方法	160
8.1 引言	160
8.2 CFAR 检测方法简介	160
8.3 杂波分布类型检验方法	163
8.3.1 Chi-Square 检验	163

8.3.2	Kolmogorov-Smirnov 检验	164
8.3.3	基于概率密度函数变换的杂波分布类型检验	165
8.3.4	几种检验方法的性能比较	170
8.4	适应多分布类型杂波的 CFAR 检测器	172
8.4.1	基于杂波分布类型检验的 CFAR 检测器	172
8.4.2	OS-CFAR 检测器和 Log-t 检测器	172
8.4.3	CFAR 检测器与杂波分布类型匹配和失配时的性能	175
8.5	杂波分布相似性分析	178
	参考文献	181
第 9 章	粒子滤波	182
9.1	引言	182
9.2	粒子滤波理论基础	182
9.2.1	状态的最优估计	182
9.2.2	基于 Monte-Carlo 方法的状态近似估计	183
9.2.3	粒子滤波方法	184
9.3	粒子退化	187
9.4	重要性密度函数的选择	188
9.5	基于 EKF 构造重要性密度函数的方法	194
9.6	基于 UKF 构造重要性密度函数的方法	196
9.6.1	无损变换	196
9.6.2	无损 Kalman 滤波方法	199
9.6.3	无损粒子滤波方法	200
9.7	基于 IEHF 构造重要性密度函数的方法	201
9.7.1	H_{∞} 滤波方法	202
9.7.2	迭代扩展 H_{∞} 滤波	207
9.7.3	迭代扩展 H_{∞} 粒子滤波	208
9.8	基于分布函数逆映射采样的粒子滤波方法	213
9.8.1	采样方法的原理及数学模型	213
9.8.2	分布函数的求解	213
9.8.3	实现步骤	215
9.9	重采样	217
	参考文献	220
第 10 章	基于粒子滤波的检测前跟踪	221
10.1	引言	221
10.2	基本 PF-TBD 的实现思路	222

10.3	基本 PF-TBD 的系统模型	224
10.4	基本 PF-TBD 的实现过程	227
10.5	Rutten PF-TBD 方法	233
10.5.1	Rutten PF-TBD 的实现思路	233
10.5.2	Rutten PF-TBD 的理论推导	234
10.5.3	Rutten PF-TBD 的实现过程	236
10.6	两种 PF-TBD 实现方法的性能分析	241
10.7	PF-TBD 实际中存在的问题及解决方法	243
10.7.1	粒子状态初始化问题	243
10.7.2	多目标检测和跟踪问题	244
	参考文献	244
第 11 章	机动弱小目标 PF-TBD	245
11.1	引言	245
11.2	基于多模型的 PF-TBD	245
11.2.1	MM-PF	246
11.2.2	MM-PF-TBD 的基本原理	250
11.2.3	MM-PF-TBD 的实现过程	252
11.3	基于交互多模型的 PF-TBD	257
11.3.1	IMM	257
11.3.2	IMM-PF	259
11.3.3	IMM-PF-TBD 的实现过程	261
	参考文献	264
第 12 章	基于动态规划的检测前跟踪	266
12.1	引言	266
12.2	动态规划方法概述	266
12.2.1	动态规划的基本概念和基本方程	266
12.2.2	最短距离问题	268
12.3	基于动态规划的检测前跟踪方法概述	270
12.3.1	基于动态规划的检测前跟踪的基本思想	270
12.3.2	基于似然比积累的动态规划检测前跟踪	272
12.3.3	基于幅度积累的动态规划检测前跟踪	274
12.3.4	性能指标	275
12.3.5	两类 DP-TBD 的性能比较	276
12.4	DP-TBD 在实际中存在的问题及解决方法	278
12.4.1	航迹关联问题	278

12.4.2	积累帧数选择及实时处理问题	280
12.4.3	DP-TBD 在 PD 体制和非 PD 体制雷达中的实现问题	281
12.4.4	多目标检测和跟踪问题	283
	参考文献	284
附录 A	不相容线性方程组的最佳 LS 解	285
	参考文献	286
附录 B	间接谱估计方法与周期图的等价性证明	287
	中英文对照表	289

第 1 章 绪 论

现代雷达目标日趋多样化,如新型弹道导弹、巡航导弹、临近空间飞行器、隐身飞机、无人机、低空飞行器及隐身舰船等。这些目标的典型特征可以概括为“高空、高速、高机动,低空、低速和低散射”。目标的雷达截面积(RCS)一般不足常规目标的百分之一甚至千分之一。同时,目标的多样化也伴随着探测环境的复杂化,例如,掠海、掠地飞行的导弹、巡航导弹,高度仅有十几米至数十米,因此探测这类目标面临着很强的地、海杂波,传统的探测技术已难以应对。从信号积累的观点看,主要问题是:在低信杂比(SCR)条件下,有限的时间内对信号积累,SCR 的改善程度不足以能检测到目标,即便可以进行长时间积累,随着积累时间的延长,目标的移动、机动导致能量扩散和多普勒频率改变,SCR 也难以提高。在有些情况下杂波存在显著的非高斯特性,即杂波尖峰显著,反映在杂波的概率密度上,曲线拖尾严重,在同样的 SCR 条件下与高斯分布杂波下的检测性能相比显著降低。此外,通常杂波存在相关性,当杂波过程随机变化的主要频率与目标多普勒频率重叠时,通过积累难以改善信杂比,从频域看就是目标多普勒频率与强杂波谱区交叠的情况。面对这些情况,传统的检测技术受到了很大限制。因此,如何应用新理论和新技术以及和新体制相结合,提高探测性能成为了探索的重要方向。

目前涉及目标检测的新理论和新方法范围很广,归纳起来主要有以下几个方面:基于混沌、分形理论发展起来的检测理论和方法;基于时频分析理论的检测方法;应用信息几何理论形成的检测方法;以球不变随机过程(SIRP)作为杂波模型,建立的似然比检测模型;从抑制杂波、改善目标积累性能角度出发,形成的各类检测方法;适应于弱小目标检测的检测前跟踪(TBD)技术等。

混沌理论用于研究由非线性系统产生的复杂过程,研究表明海杂波具有典型的混沌特征,基于混沌理论检测小目标,是将海杂波看做混沌时间序列,从两个方面进行目标检测^[1]:一是通过雷达回波混沌特征参数的变化分析判断是否存在目标;二是利用混沌序列具有短期可预测而长期不可预测的特点来检测目标。由于海面结构的自相似性,分形理论可用于海杂波建模及目标检测,其主要思想是通过比较海杂波和目标分形维数的不同来实现对目标的检测^[2],但存在的主要缺点是计算回波的分形维数往往需要较长的数据。当雷达回波频谱具有非平稳特征时,时频联合分析方法成为信号分析的有力工具。时频分布函数描述了信号在时间和频率上的能量或者强度分布。基于时频分析的目标检测方法^[3]有分数阶傅里叶变换(FRFT),Wigner-Hough 变换(WHT)、联合时频分析等,可根据信号和杂波

时频特征的不同,提取有用的图像特征来区分杂波和信号,从而达到检测的目的。信息几何是源于对概率分布流形的内在几何性质研究而发展起来的理论方法,用于信号检测是将目标有无两种假设下的概率分布看作统计流形中的两个点,通过比较由观测数据得到的概率分布与二者之间距离的大小来实现目标的检测,将检测问题转化为统计流形上的几何问题^[4]。目前这方面研究还处于初级阶段,许多问题有待进一步研究和解决,如不同类型概率分布下统计流形的建立及怎样定义相应的距离等。

大量的理论分析和实验研究表明,地、海杂波通常呈现显著的非高斯统计特性和相关特性,其杂波统计分布具有长拖尾分布特征,高斯统计分布几乎不适用于描述海杂波和很少适用于地杂波,尤其针对宽带(高分辨)雷达^[5]。1999年,澳大利亚科学与技术局(DSTO)通过海上监视雷达实测的大量海杂波数据,对不同海况条件下雷达海杂波的非高斯特性和相关特性进行了详细分析^[6]。如何在复杂杂波背景下积累(检测)弱目标一直是雷达探测技术中的难点。SIRP是描述非高斯相关杂波的主要分布模型,最早由统计学家Vershik于1964年提出^[7]。Yao于1973年提出将杂波描述为零均值相关高斯随机过程(散斑分量)与实非负随机变量(调制分量)的乘积^[8],其后SIRP被广泛用于非高斯相关杂波模型。

似然比检测(LRT)是雷达目标检测的理论基础和重要方法。在SIRP杂波背景下,Dennis给出了目标信号参数确知、参数未知以及参数随机等几种不同信号形式下的LRT形式^[9],并基于几种具体分布的SIRP杂波(K分布、Student-t分布等),导出了具体的检测统计量。由于建立检测模型是基于杂波的多维联合概率密度,因此其结构比较复杂。在低信噪比(SNR)情况下,Prakash通过对似然函数的泰勒级数展开给出了基于SIRP杂波的局部最优检测器^[10]。当目标回波含有随机参数时,建立LRT模型需要积分运算,因此将粒子滤波引入LRT中,将复杂的多重积分运算转化为求和运算,进而求取似然函数,这也是可取的方法^[11]。

在LRT统计量不易导出的情况下,也可仅考虑杂波过程的一维概率密度和相关性,从抑制杂波的非高斯特性和相关性角度设计检测器。这类方法仅涉及观测数据的相关矩阵或功率谱,不涉及联合概率密度,因此易于导出和实现^[12]。在雷达杂波存在显著非高斯特性时,实验表明应用二阶统计量处理往往会导致性能严重下降,甚至出现错误的结果。因此,由Shao和Nikias在 α 稳定分布基础上提出的分数低阶统计量可作为处理非高斯过程的工具^[13,14]。

上述方法提高弱目标的检测性能,主要是针对单次扫描(单帧)数据基于杂波背景建立合理的检测模型,以便更好地对弱目标信号进行积累,尽可能改善SCR;而检测前跟踪算法利用目标信号的帧间相关性进行帧间积累,形成目标航迹。

检测前跟踪(TBD),顾名思义是一种先跟踪后检测的技术,最早应用于红外图像序列中的弱目标检测^[15,16],后来逐步发展到雷达弱目标检测领域^[17~19]。

其基本思想是:为保留弱目标信息,对单帧雷达数据不做目标判决,而是根据目标的运动规律和帧间的相关性,通过多帧联合处理,使弱目标的能量沿其航迹积累后再作判决,同时得到判决结果和目标航迹。由于既利用了单次相参或非相参积累,也利用了帧间的非相参积累,因此 TBD 能提高雷达对弱目标的探测能力。目前,实现 TBD 的方法有三维匹配滤波^[15]、Hough 变换^[13]、粒子滤波(PF)^[19,20]以及动态规划(DP)^[16,18]等。其中,基于粒子滤波的 TBD 方法和基于 DP 的 TBD 方法是重点。

粒子滤波^[21]的机理最早可追溯到 20 世纪 50 年代,是指根据重要性密度函数采样一系列随机粒子(样本),然后用这些粒子的加权和近似所求的概率密度函数(PDF),以样本均值代替积分运算,得到状态在最小均方误差准则下的最优估计。然而,该方法随着迭代次数的增加,粒子权值方差不断增大,最后只有极少数甚至一个粒子具有较大权值,不能有效表征所求 PDF,存在退化问题^[22]。为了解决该问题,人们提出了多种构造重要性密度函数的方法,以提高其与状态后验 PDF 的逼近程度,减小权值方差。1993 年,Gordon 等^[23]在状态先验分布作为重要性密度函数的基础上,又提出了一种重采样方法,增加了权值大的粒子数,进一步解决了退化问题,奠定了粒子滤波方法的理论基础,常被称为基本(或标准)粒子滤波方法。粒子滤波方法在处理非线性非高斯系统的状态估计方面具有优势。2001 年,Salmond 等^[20]首次将粒子滤波应用到 TBD 领域。其基本思想是:对于初始数据帧,在观测区域内均匀抛洒粒子以表示目标的可能状态。当下一数据帧到来后,通过状态方程获得粒子在当前帧的状态取值,并计算粒子对应的权值,根据表示目标状态的粒子数确定检测门限,当判定目标存在时,再通过粒子估计目标状态,以此类推。在 Salmond 等的基础上,Rutten 等^[24]提出了另外一种基于粒子滤波的 TBD(PF-TBD)方法,该方法仅考虑目标连续出现和目标新出现两种可能,然后利用这两种情况对应的后验 PDF 的加权和得到目标状态与目标出现状态的联合后验 PDF,最后根据贝叶斯原理推导出目标出现概率的理论模型进行目标判决,当判定目标存在时,再对目标状态进行估计。与 Salmond 提出的方法相比,Rutten 提出的方法中所有粒子都代表目标的状态,粒子有效利用率更高,具有更好的检测和跟踪性能^[25]。

DP 是一种基于最优化原理的优化方法,最早由 Bellman^[26]于 1957 年提出。该方法能将一个 N 维优化问题转换为 N 个一维优化问题,通过给定的最优准则,使目标函数(根据问题不同而不同)达到最优,最终得到全局的最优解。20 世纪 80 年代,Barniv^[16]首次将 DP 用于解决红外图像序列中弱小目标的检测和跟踪问题。随后,Wallace^[18]将其应用到 PD 体制雷达。其基本思想是:以观测值的似然函数作为优化决策过程中的目标函数,将航迹上的能量积累看做是一个多阶段最优决策过程,并对其进行分阶段处理,将能量积累过程表示成递归累加形式。通过寻找

各子阶段的最大目标函数对应的最优子航迹,从而寻找全局的最大目标函数对应的最优航迹。在 Barniv 的基础上,James 等^[27]进一步发展了该方法,同时考虑了目标有、无两种假设下的似然函数,提出了一种基于似然比构造目标函数的方法。但是,该方法仅考虑了非起伏模型目标的检测,针对起伏模型的目标,检测性能会下降。针对这个问题,Tonissen 等^[28]提出了直接利用回波幅度构造目标函数,这种方法不需要已知噪声环境的先验知识,可以检测起伏模型的运动目标,具有较好的检测性能,但跟踪性能较差。在确定信号高斯噪声的条件下,这种方法实际上是基于似然比构造目标函数的一种特例。上述三种方法奠定了基于 DP 的 TBD (DP-TBD)方法的理论基础,之后人们根据不同的应用,提出多种改进方法,主要集中在解决能量扩散效应、提高检测和跟踪性能、实现机动和多目标的检测以及跟踪等方面,使 DP-TBD 方法得到不断的完善和发展。

参 考 文 献

- [1] Haykin S, Li X B. Detection of signals in chaos[J]. Proceedings of the IEEE, 1995, 83(1): 95-122.
- [2] Lo T, Leung H, Litva J, et al. Fractal characterisation of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets[J]. IEE Proc F, 1993, 140(4): 243-250.
- [3] Yasotharan A, Thayaparan T. A time-frequency method for detecting an accelerating target in sea or land clutter[J]. IEEE Transactions on AES, 2006, 42(4): 1289-1310.
- [4] Barboreco F. Interaction between symmetric cone and information geometries: Bruhat-tits and siegel spaces models for high resolution autoregressive doppler imagery [C]//EVTC '08 Conf., Ecole polytechnique, 2008, lectures in computer science, 2009, 5416: 124-163.
- [5] Skolnik M I. 雷达系统导论[M]. 左群声, 徐国良, 马林, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [6] Antipov I. Statistical analysis of northern australian coastline sea clutter data[R]. Edinburg: DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, 2001.
- [7] Vershik A M. Some characteristic properties of Gaussian stochastic processes[J]. Theory of Problem and Its Application, 1964, 9(3): 353-356.
- [8] Yao K. A representation theorem and its application to spherically invariant random processes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1973, 19(5): 600-608.
- [9] Dennis L A. Coherent radar detection in non-Gaussian clutter[R]. New York: Syracuse University, 2004.
- [10] Prakash R. High-level adaptive signal processing architecture with applications to radar non-Gaussian clutter, the problem of weak signal detection[R]. New York: Syracuse University, 1995.
- [11] Boers Y, Driessen H. A particle-filter-based detection scheme[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(10): 300-302.
- [12] Richards M A. 雷达信号处理基础[M]. 邢孟道, 王彤, 李真芳, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [13] Nikias C L, Shao M. Signal Processing with Alpha-Stable Distributions and Applications[M]. New York: Wiley, 1995.
- [14] Nikias C L, Shao M. Signal processing with fractional lower order moments: Stable processes and their applications[J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(7): 986-1010.
- [15] Reed I S, Gagliardi R M, Shao H M. Application of three-dimensional filtering to moving target

- detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1983, 19(6): 898-905.
- [16] Barniv Y. Dynamic programming solution for detecting dim moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21(1): 144-156.
- [17] Carlson B, Evans E. Search radar detection and track with the Hough transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(1): 102-108.
- [18] Wallace W R. The use of track-before-detect in pulse-doppler radar [C]//International Radar Conference, Edinburgh, 2002: 315-319.
- [19] Boers Y, Driessen J N. Particle filter based detection for tracking [C]//Proceedings of American Control Conference, VA, 2001, 6: 4393-4397.
- [20] Salmond D J, Birch H. A particle filter for track-before-detect [C]//Proceedings of American Control Conference, VA, 2001, 6: 3755-3760.
- [21] Hammersley J M, Morton K W. Poor man's Monte Carlo[J]. Journal of the Royal Statistical Society B, 1954, 16: 23-38.
- [22] Kong A, Liu J S, Wong W H. Sequential imputations and Bayesian missing data problems[J]. Journal of American Statistical Association, 1994, 89(2): 278-288.
- [23] Gordon N, Salmond D, Smith A. Novel approach to nonlinear and non-Gaussian Bayesian state estimation[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 1993, 140(2): 107-113.
- [24] Rutten M G, Gordon N J, Maskell S. Efficient particle-based track-before-detect in Rayleigh noise [C]//Proceedings of International Conference on Information Fusion, Sweden, 2004, 5428: 509-519.
- [25] Rutten M G, Ristic B, Gordon N J. A comparison of particle filters for recursive track-before-detect [C]//Proceedings of International Conference on Information Fusion, Australia, 2005, 1: 169-175.
- [26] Bellman R. Dynamic Programming[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1957.
- [27] James A, Scott S. Efficient target tracking using dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 44-56.
- [28] Tonissen S M, Evans R J. Performance of dynamic programming techniques for track- before-detect[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1440-1451.

第 2 章 参数估计和统计检测基础

2.1 引言

从观测信号中通常需要获取以下几方面的信息:①是否包含所期望的信号,但由于观测噪声或干扰存在,几乎无法直接判断;②估计期望信号的参数,如信号的幅度、频率和初相等,甚至噪声的均值和方差等;③重现信号的波形,即滤除噪声的影响;④当信号的特征在时域不易观察时,变换到频域获取谱特征。解决上述问题涉及以下内容:①参数估计和统计检测;②最佳滤波理论;③功率谱估计。这些内容是现代雷达目标检测和跟踪的基础理论。因此,后面 3 章对这几部分内容进行概括和总结,作为本书的基础理论。

本章介绍参数估计和统计检测的基本内容。参数估计包括未知的确定性参数估计和随机参数估计两部分。在确定性参数估计中,主要介绍最小方差无偏(MVU)估计、最大似然估计(MLE)和矩估计。前两种估计方法涉及观测样本的 PDF,而矩估计仅依据观测样本矩实现。随机参数估计主要是基于贝叶斯风险(平均代价)最小准则导出的估计量,采用不同的代价函数可得到条件中值估计量、最大后验(MAP)估计量和最小均方误差(MMSE)估计量,这些估计量涉及随机参数的条件 PDF。此外还有一种重要的估计量——线性最小均方误差(LMMSE)估计量,其不需要知道条件 PDF,仅根据参数和观测样本的二阶矩即可实现,该估计量是维纳滤波的理论基础。检测理论是基于统计学中的假设检验发展起来的,根据贝叶斯风险最小准则和 N-P(Neyman-Pearson)准则导出的检测模型都统一在 LRT 模型框架下,区别在于检测门限的确定方法不同。前者根据指定的代价和先验概率确定检测门限,后者根据指定的虚警概率确定检测门限。此外,贝叶斯风险最小准则还有几个特例,分别是最小错误概率准则、MAP 概率准则和最大似然准则。参数估计与检测方法之间联系紧密,如在构造广义似然比检测统计量时,首先需要估计未知参数。此外,在某些条件下估计统计量与检测统计量具有相同的形式。

2.2 参数估计

要估计的参数分为未知的确定性参数和随机参数,而对随机参数的估计是估