

现代雷达目标检测 理论与方法

(第二版)

王首勇 万 洋 刘俊凯 等 著

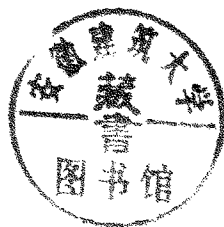


科学出版社

现代雷达目标检测 理论与方法

(第二版)

王首勇 万 洋 刘俊凯 等 著



科学出版社

北 京

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、非高斯分布杂波下似然比检测、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、基于动态规划的检测前跟踪技术和基于信息几何的目标检测等。

本书可作为雷达目标探测、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. —2 版. —北京: 科学出版社, 2015.10

ISBN 978-7-03-045758-5

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 (2015) 第 225189 号

责任编辑: 张艳芬 / 责任校对: 张怡君
责任印制: 张 倩 / 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

2015 年 10 月第 二 版 印张: 21 1/2

2015 年 10 月第二次印刷 字数: 418 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第二版前言

如何在复杂目标和环境下提高雷达的探测性能一直是雷达技术中的重要发展方向。传统的目标检测技术（如 MTD）对目标和环境不具有自适应性，使其检测性能受到很大影响。为克服其存在的问题，围绕着复杂目标和杂波（干扰）特性，以及应用背景等方面，发展了许多新理论和新方法。尽管这些理论方法看起来迥然不同，但本质上有其共同特点，就是针对目标和杂波特性，尽可能对信号进行有效积累，或最大限度抑制杂波，以便达到更可靠检测目标的目的。本书从非高斯分布杂波下的似然比建模、杂波抑制、杂波自适应 CFAR 处理、单帧和多帧数据的联合积累、把统计检测问题转化为几何度量等方面，论述了主要的目标检测理论和方法。

本书第二版保留了第一版的主要内容，并对部分内容作了调整：①对某些概念、方法的描述和细节进行了修订和补充。②在对 Kalman 滤波算法论述方面，把观测数据空间分解为两个正交子空间的直和，从系统状态估计等价于状态在两个子空间投影之和的角度导出 Kalman 滤波递推算法，概念更加清晰。③在对 MUSIC 谱估计方法论述方面，把观测信号相关矩阵的特征向量作为空间的正交基，而在该基下划分信号和噪声子空间，以有助于对该方法的深入理解。

增加了基于信息几何检测方法的基本内容，以作为开展该方面研究的入门知识。信息几何是在黎曼流形上采用微分几何方法研究统计学问题的一门新兴学科，其应用于目标检测中的主要思想是将参数化的概率分布族构建为一个统计流形，雷达目标检测模型中的两种假设分布对应了流形上的两个点，则利用观测数据估计得到的分布与两假设分布间的测地线距离之差实现目标检测，即把统计检测问题转化为几何问题，为目标检测提供了新的思路和途径。本书简介了信息几何的基本概念，及其应用在检测中的实现过程，并介绍了由矩阵流形上的测地线距离导出的矩阵 CFAR 检测方法。

全书共 13 章。第 1 章概述现代雷达目标检测理论和方法的研究现状和发展；第 2~4 章概括归纳雷达目标检测的理论基础，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；第 5 章介绍雷达目标和杂波的统计特性；第 6 章总结基于球不变随机过程的统计检测方法；第 7 章介绍基于杂波抑制的目标检测方法；第 8 章介绍多杂波分布类型下的 CFAR 检测方法；第 9 章论述粒子滤波理论模型和算法，围绕解决粒子退化问题，对构造重要性密度函数的方法进行了讨论；第 10 章论述基于粒子滤波的 TBD 算法；第 11 章讨论适应于机动目标

的粒子滤波 TBD 算法；第 12 章介绍基于动态规划的 TBD 算法；第 13 章简介基于信息几何的检测方法。

本书第 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、郑作虎撰写；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；第 13 章由赵兴刚、刘俊凯撰写。李昕哲、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。

由于该技术发展日新月异，加之作者的学识有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者不吝指正。

王首勇

2015 年 5 月于武汉

第一版前言

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

第二版前言

第一版前言

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	7
2.1 引言	7
2.2 参数估计	7
2.2.1 确定性参数估计	8
2.2.2 随机参数的贝叶斯估计	14
2.3 统计检测	25
2.3.1 检测准则	25
2.3.2 确定性信号检测	29
2.3.3 随机信号检测	34
2.3.4 具有未知参数的信号检测	37
参考文献	39
第 3 章 最佳滤波理论	40
3.1 引言	40
3.2 维纳滤波	40
3.2.1 概述	40
3.2.2 维纳滤波理论模型	41
3.2.3 FIR 维纳滤波器	41
3.3 最小二乘滤波	44
3.3.1 最小二乘滤波系数求解	44
3.3.2 基于 QR 分解求解 LS 滤波系数	52
3.3.3 基于奇异值分解求解 LS 滤波系数	53
3.4 Kalman 滤波	55
3.4.1 Kalman 滤波算法	56
3.4.2 扩展 Kalman 滤波	61
3.4.3 扩展 Kalman 滤波应用举例	63

3.5 匹配滤波和特征滤波	67
3.5.1 匹配滤波	67
3.5.2 特征滤波	71
参考文献	74
第4章 功率谱估计方法	76
4.1 引言	76
4.2 非参数功率谱估计方法	76
4.2.1 间接估计方法	77
4.2.2 直接估计方法	78
4.2.3 周期图的滤波器组实现	80
4.2.4 改进周期图方法	82
4.3 参数功率谱估计方法	84
4.3.1 功率谱模型	84
4.3.2 AR 模型参数估计	87
4.3.3 MA 模型参数估计	90
4.3.4 ARMA 模型参数估计	92
4.4 最小方差谱估计	94
4.4.1 时域滤波情况	94
4.4.2 MV 谱估计	96
4.4.3 空域滤波情况	97
4.4.4 MV 空间谱估计	100
4.5 基于相关矩阵谱分解的频率估计	100
4.5.1 信号模型	100
4.5.2 MUSIC 方法	102
4.5.3 实验结果	109
4.6 现代信号处理方法的特点分析	112
4.6.1 白噪声条件下的信号积累	113
4.6.2 色噪声条件下的信号积累	115
参考文献	115
第5章 目标与杂波统计特性	117
5.1 引言	117
5.2 现代雷达目标的特点	117
5.3 目标 RCS 统计模型	118
5.4 杂波统计特性	120
5.4.1 杂波散射强度	120

5.4.2	杂波一维概率分布模型	124
5.4.3	杂波的相关性模型	129
5.5	基于球不变随机过程的杂波联合分布模型	132
5.5.1	复 SIRV 的联合概率密度函数	132
5.5.2	基于正交双通道数据的 SIRV 的联合 PDF	134
5.5.3	K 分布和 Student-t 分布的联合 PDF	135
	参考文献	135
第 6 章	非高斯分布杂波下似然比统计检测方法	137
6.1	引言	137
6.2	SIRP 杂波背景下似然比检测方法	137
6.2.1	未知参数条件下似然比检测	138
6.2.2	未知参数条件下似然比检测的近似形式	141
6.2.3	随机参数条件下的似然比检测	143
6.3	SIRP 杂波背景下局部最优检测	149
6.4	SIRP 杂波背景下基于粒子滤波的似然比检测	153
6.4.1	基本粒子滤波算法	153
6.4.2	基于粒子滤波的似然比检测模型	154
	参考文献	156
第 7 章	基于杂波抑制的目标检测方法	158
7.1	引言	158
7.2	高斯分布杂波条件下的目标检测	158
7.2.1	基于匹配滤波的目标检测	158
7.2.2	基于特征滤波的目标检测	161
7.2.3	基于杂波 AR 模型建模的目标检测	162
7.3	非高斯分布杂波条件下的目标检测	163
7.3.1	基于分数低阶匹配滤波的目标检测	164
7.3.2	基于分数低阶特征滤波的目标检测	169
7.3.3	基于杂波 AR SaS 模型建模的目标检测	171
	参考文献	174
第 8 章	多分布类型杂波背景下的 CFAR 检测方法	175
8.1	引言	175
8.2	CFAR 检测方法简介	175
8.3	杂波分布类型检验方法	178
8.3.1	Chi-Square 检验	178
8.3.2	Kolmogorov-Smirnov 检验	179

8.3.3 基于概率密度函数变换的杂波分布类型检验	180
8.3.4 几种检验方法的性能比较	185
8.4 适应多分布类型杂波的 CFAR 检测器	187
8.4.1 基于杂波分布类型检验的 CFAR 检测器	187
8.4.2 OS-CFAR 检测器和 Log-t 检测器	187
8.4.3 CFAR 检测器与杂波分布类型匹配和失配时的性能	191
8.5 杂波分布相似性分析	193
参考文献	196
第 9 章 粒子滤波	197
9.1 引言	197
9.2 粒子滤波理论基础	197
9.2.1 状态的最优估计	197
9.2.2 基于 Monte-Carlo 方法的状态近似估计	198
9.2.3 粒子滤波方法	199
9.3 粒子退化	202
9.4 重要性密度函数的选择	203
9.5 基于 EKF 构造重要性密度函数的方法	209
9.6 基于 UKF 构造重要性密度函数的方法	211
9.6.1 无损变换	211
9.6.2 无损 Kalman 滤波方法	214
9.6.3 无损粒子滤波方法	215
9.7 基于 IEHF 构造重要性密度函数的方法	216
9.7.1 H_{∞} 滤波方法	217
9.7.2 迭代扩展 H_{∞} 滤波	222
9.7.3 迭代扩展 H_{∞} 粒子滤波	223
9.8 基于分布函数逆映射采样的粒子滤波方法	228
9.8.1 采样方法的原理及数学模型	228
9.8.2 分布函数的求解	228
9.8.3 实现步骤	230
9.9 重采样	232
参考文献	235
第 10 章 基于粒子滤波的检测前跟踪	236
10.1 引言	236
10.2 基本 PF-TBD 的实现思路	237
10.3 基本 PF-TBD 的系统模型	239

10.4	基本 PF-TBD 的实现过程	242
10.5	Rutten PF-TBD 方法	248
10.5.1	Rutten PF-TBD 的实现思路	248
10.5.2	Rutten PF-TBD 的理论推导	249
10.5.3	Rutten PF-TBD 的实现过程	251
10.6	两种 PF-TBD 实现方法的性能分析	256
10.7	PF-TBD 实际中存在的问题及解决方法	258
10.7.1	粒子状态初始化问题	258
10.7.2	多目标检测和跟踪问题	259
	参考文献	259
第 11 章	机动弱小目标 PF-TBD	260
11.1	引言	260
11.2	基于多模型的 PF-TBD	260
11.2.1	MM-PF	261
11.2.2	MM-PF-TBD 的基本原理	265
11.2.3	MM-PF-TBD 的实现过程	267
11.3	基于交互多模型的 PF-TBD	272
11.3.1	IMM	272
11.3.2	IMM-PF	274
11.3.3	IMM-PF-TBD 的实现过程	276
	参考文献	279
第 12 章	基于动态规划的检测前跟踪	281
12.1	引言	281
12.2	动态规划方法概述	281
12.2.1	动态规划的基本概念和基本方程	281
12.2.2	最短距离问题	283
12.3	基于动态规划的检测前跟踪方法概述	285
12.3.1	基于动态规划的检测前跟踪的基本思想	285
12.3.2	基于似然比积累的动态规划检测前跟踪	287
12.3.3	基于幅度积累的动态规划检测前跟踪	289
12.3.4	性能指标	290
12.3.5	两类 DP-TBD 的性能比较	291
12.4	DP-TBD 在实际中存在的问题及解决方法	294
12.4.1	航迹关联问题	294
12.4.2	积累帧数选择及实时处理问题	296

12.4.3 DP-TBD 在 PD 体制和非 PD 体制雷达中的实现问题	297
12.4.4 多目标检测和跟踪问题	299
参考文献	300
第 13 章 基于信息几何的目标检测方法	301
13.1 引言	301
13.2 信息几何的基本理论	301
13.2.1 从微分几何到信息几何	301
13.2.2 信息几何的基本概念	303
13.3 统计检测的信息几何方法	309
13.3.1 距离检测器	309
13.3.2 距离检测器在弱目标检测中的应用	310
13.4 矩阵 CFAR 检测方法	312
13.4.1 矩阵流形及测地线距离	312
13.4.2 矩阵的黎曼均值	314
13.4.3 矩阵 CFAR 检测方法	316
参考文献	318
附录 A 标量函数对向量的导数	320
参考文献	325
附录 B 不相容线性方程组的最佳 LS 解	326
参考文献	327
附录 C 间接谱估计方法与周期图的等价性证明	328
中英文对照表	330

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^[4],对于该理论及其在目标检测中的应用,本章后面给予介绍。

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是描述非高斯分布杂波的主要模型,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 被广泛用于非高斯分布杂波模型。

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。

信息几何的主要思想是建立拥有黎曼度量和对偶联络的统计流形,并引入散度作为距离函数。1945年,Rao提出用Fisher信息矩阵来定义统计流形上的黎曼度量^[29],并以此计算概率分布函数间的测地线距离来度量分布函数间的差异,与信息论中的KL分离度和香农信息熵形成对比,从而开启了统计的几何学理论研究。1972年,Chentsov完成了许多基础性的工作^[30],特别是引入了一个仿射联络族,并证明Fisher信息与仿射联络在概率分布流形中的唯一性。与此同时,Efron也做了与Chentsov不同的开拓性工作^[31],他定义了统计流形的曲率概念,并指出曲率在统计推断的高阶渐进理论中的基本作用。此后,统计的几何理论进入了一个快速发展的阶段,特别是Amari,做了大量的工作,他引入了单参数的仿射联络族(α -联络),建立了统计流形的对偶几何结构,极大丰富和完善了统计的几何学理论框架^[32,33],进而建立了信息几何。近年来,信息几何的理论基础不断完善,同时已在信息理论、系统理论、神经网络和统计推断等领域得到了广泛应用。

信息几何研究的对象是由概率分布族所构成的统计流形,其应用在目标检测中的主要思想是将雷达二元目标检测模型中的两种假设分布看做流形上的两个点,则在流形上利用由观测数据估计得到的分布与两假设分布间的距离之差实现目标检测,为检测问题提供了一种新的途径,具有较大的发展潜力^[34]等。另外比较有代表性的是Barbaresco等基于正定矩阵流形实现脉冲多普勒雷达矩阵CFAR检测的研究^[35,36],该方法通过建立Toeplitz正定矩阵流形,利用检测单元的协方差矩阵与参考单元协方差矩阵黎曼均值间的距离与门限比较来实现目标的CFAR检测。

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.