



工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版

雷达目标检测 稀疏域理论及应用

陈小龙 关键 于晓涵 黄勇 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍雷达目标检测稀疏域理论及其应用。全书分三部分共9章，内容包括雷达目标检测概述、稀疏表示和雷达回波稀疏特性、基于稀疏优化的稀疏时频分析雷达目标检测方法、基于稀疏傅里叶变换（SFT）的稀疏分数阶表示域动目标检测方法、基于自适应双门限SFT的雷达动目标检测方法、稀疏分数阶表示域杂波抑制和动目标检测、稀疏长时相参积累动目标检测方法、基于稀疏表示的阵列雷达空距频聚焦处理，以及回顾与展望。附录中给出了雷达数据库与海杂波抑制的内容和缩略语对照表。

本书可作为信号处理、目标检测和识别等相关专业研究生或高年级本科生的教学参考书，也可供从事该领域工作的研究人员或技术开发人员学习参考。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

雷达目标检测稀疏域理论及应用/陈小龙等著. —北京：电子工业出版社，2024.1

ISBN 978-7-121-46674-8

I. ①雷… II. ①陈… III. ①雷达目标—目标检测—研究 IV. ①TN951

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 219282 号

责任编辑：谭海平

印 刷：

装 订：

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：720×1000 1/16 印张：14.75 字数：297 千字

版 次：2024 年 1 月第 1 版

印 次：2024 年 1 月第 1 次印刷

定 价：89.00 元

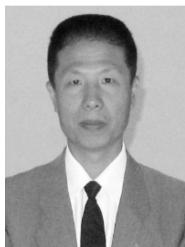
凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254552，tan02@phei.com.cn。



陈小龙, 海军航空大学教授, 长期从事雷达弱小目标探测、智能信号处理等领域的研究工作。曾获国家自然科学基金优秀青年基金资助, 已出版学术专著 3 部, 其中 1 部获国家科学技术学术著作基金资助, 参与制定中国电子学会标准 1 项。获省部级科技奖励 5 项。被评为中国电子学会优秀科技工作者, 担任中国电子学会青工委委员、信号处理分会委员, 《信号处理》《雷达学报》期刊优秀编委。



关键, 海军航空大学教授。研究方向为海上目标探测。已出版专著 3 部, 曾获国家科技进步二等奖 1 项、省部级科技奖一等奖 4 项; 获中国科协“求是奖”、全国优秀博士学位论文奖; 国家百千万人才工程国家级人选。



于晓涵, 海军研究院工程师, 海军航空大学博士; 从事雷达目标检测、稀疏信号处理、大数据等方面的研究工作; 作为主要完成人参与国家自然科学基金项目 1 项、军队“十四五”规划重点项目 2 项; 已发表 SCI、EI 等高水平学术论文 9 篇, 获得国家/国防发明专利 5 项。



黄勇, 海军航空大学教授, 研究领域为雷达信号处理、海上目标探测。曾获首届山东省高等学校青创科技团队带头人、山东省优秀创新团队“信息融合及应用创新团队”核心成员等荣誉。发表学术论文 50 余篇, 获得国家发明专利 20 余项, 出版专著 2 部。获省部级奖励 3 项。

序一

复杂背景下雷达微弱目标检测是雷达领域的一大难题，基于傅里叶变换的传统处理方法难以获得理想或满足实际需求的探测性能，亟需发展新的目标检测理论和方法。本书紧密围绕复杂环境下低可观测目标探测，集中介绍了域理论及其在雷达目标检测中的应用。全书共分三部分。第一部分介绍基于优化求解的稀疏时频分析理论，将稀疏表示理论引入时频分析方法中，构建了短时稀疏域理论模型，提出了多种短时稀疏变换动目标检测方法。第二部分介绍基于稀疏傅里叶变换（SFT）的快速稀疏变换理论，主要针对强杂波抑制及恒虚警检测器设计，使其更好地适应复杂多变的雷达目标探测环境，包括稀疏分数阶傅里叶变换、稀疏分数阶模糊函数、自适应双门限 SFT、稳健稀疏分数域处理及杂波抑制等方法。第三部分为稀疏长时间相参积累理论，通过延长观测时间提高积累增益，同时利用稀疏变换的优势实现快速运算。

本书将传统的傅里叶变换雷达成动目标检测方法扩展为稀疏域，既扩展了信号处理的维度，又延伸了稀疏表示和经典时频变换的理论及应用。因此，对促进学科专业发展具有重要意义。本书注重原理，联系应用，大部分方法经过雷达实测数据验证，为复杂动目标检测及精细化处理提供了有效支撑，具有重要的理论价值和应用价值。



序二

稀疏表示自提出以来，已在电气工程、计算机视觉和图像处理等领域得到了广泛应用，尽管已有很多优秀的专著书籍，但目前还没有雷达信号处理和目标检测相关专著出版，关于稀疏变换也鲜有涉及。本书作者团队深耕雷达信号处理二十余年，在恒虚警检测、分形处理、变换域检测等领域深入研究，已出版三本学术专著。本书从精细化特征提取、大数据量高效处理等角度，主要介绍雷达目标检测的稀疏域理论及应用，利用目标回波在多种表示域中具有稀疏性的特点，创新性地将动目标检测问题转换为稀疏域中的求解和检测问题，分别以稀疏优化和稀疏傅里叶变换为基础，发展和完善了雷达稀疏变换理论模型，提出了高分辨时频特征提取和检测方法。

本书涵盖了经典雷达动目标检测方法、稀疏表示、时频变换、分数阶傅里叶变换理论、稀疏傅里叶变换、长时间相参积累、阵列雷达信号处理等内容，从稀疏表示、稀疏时频分布、稀疏分数阶处理、稀疏长时间相参积累、杂波抑制、目标检测等多个角度阐述，各章之间紧密联系并递进，便于读者理解掌握，对于从事复杂场景下雷达弱小目标检测、目标识别等领域的专业技术人员有重要的参考价值，是一本很好的学术专著。

本书作者团队围绕雷达目标探测，长期开展海上目标探测试验，获取了不同平台、不同波段、不同海况、多种目标的雷达实测数据，用于验证本书的理论和方法，并且进行了详细深入的分析与讨论，部分成果已在多型雷达装备中得到了验证和应用。愿本书的出版能对稀疏域信号处理理论的发展及提升雷达目标探测能力起到重要作用。



前　　言

雷达作为目标探测和监视领域的主要手段，在军事和民用领域都发挥着重要作用。然而，受复杂探测环境和目标复杂运动特性的影响，目标回波不同程度地表现出低可观测性。低可观测目标回波信杂比（SCR）低，且具有非平稳、非均匀特性，这增大了雷达探测的难度。此外，新体制雷达多采用数字化阵列技术，在提高信号采样质量的同时增加了数据量，对系统的实时处理性能提出了更高的要求。因此，迫切需要创新雷达探测技术，亟待发展高时频分辨率、大数据量、自适应以及适用于多分量信号分析的方法和手段。

本书在分析总结国内外主要工作的基础上，结合团队近五年的研究成果与工程实践经验，阐述稀疏域理论雷达目标检测方法。团队在雷达目标检测领域已出版三本学术专著：第一本是《雷达目标检测与恒虚警处理》（清华大学出版社），全面介绍了近年来雷达目标检测领域的技术和新进展，讨论如何自适应形成门限，实现恒虚警（CFAR）检测，目前已出版了第三版；第二本是《雷达目标检测的分形理论及应用》（电子工业出版社），主要通过非线性分形特征区分杂波和目标；第三本是《雷达目标检测分数域理论及应用》（科学出版社），该书获得2020年国家科学技术学术著作出版基金资助，主要从目标能量积累和信杂比改善的角度，介绍分数阶傅里叶变换（FRFT）抑制杂波和检测微动信号的方法与应用。本书则从精细化特征提取、大数据量高效处理等角度，介绍雷达目标检测的稀疏域理论及应用，内容涵盖经典雷达成动目标检测方法、稀疏表示、时频变换、分数阶傅里叶变换理论、稀疏傅里叶变换、长时间相参积累、杂波抑制、目标检测器设计等，结合稀疏表示和稀疏变换的优势，在稀疏域实现雷达回波的高分辨率、低复杂度时频表示，并进行目标检测和运动参数估计。书中部分方法已在导航雷达、机载对海搜索雷达、高分辨调频连续波雷达、探鸟雷达等系统中得到验证和应用。

全书分三部分，共9章，各章节的具体内容安排如下。

第一部分包括第1章～第3章，基于稀疏优化求解的稀疏变换理论，实现动目标高分辨时频表示。第1章对雷达成动目标检测技术进行概述，介绍稀疏域动目标检测技术的研究现状，对其优势及存在的问题进行分析。第2章介绍稀疏表示的基本原理及常用的稀疏分解方法，并在时频分布模型的基础上采用实测数据分析雷达回波稀疏特性；第3章重点阐述短时稀疏分数阶表示域（ST-SFRRD）的理论模型及动目标检测方法。

第二部分包括第 4 章～第 6 章，基于稀疏傅里叶变换（SFT）的稀疏变换理论，实现杂波背景下动目标的快速 CFAR 检测。第 4 章重点介绍 SFT 的基本框架、快速实现方法，以及稀疏 FRFT（SFRFT）和稀疏分数阶模糊函数（SFRAF）动目标检测器。第 5 章和第 6 章重点阐述稀疏变换杂波抑制和 CFAR 检测器设计方法，主要介绍自适应双门限 SFT、稳健 SFRFT、SFRAF 自适应杂波抑制及动目标检测方法，实现强杂波背景中动目标的有效检测。

第三部分包括第 7 章～第 9 章，介绍新体制雷达稀疏变换长时间处理理论。第 7 章首先阐述雷达长时间积累的概念和模型，然后分别从参数搜索类长时间相参积累（LTCI）、稀疏变换 LTCI、非参数搜索 LTCI 及杂波虚警点剔除等方面介绍稀疏 LTCI 动目标检测方法，实现跨距离和多普勒单元的动目标回波的快速积累和检测。第 8 章首先介绍基于稀疏表示的阵列雷达空距频聚焦处理方法。第 9 章介绍稀疏表示技术在雷达信号处理中的应用展望，主要包括稀疏表示与新体制雷达信号处理、高分辨成像、深度学习、目标识别等内容。

本书的出版得到了工业和信息产业科技与教育专著出版资金、国家自然科学基金、山东省自然科学基金、山东省重点研发计划等项目的支持。本书由陈小龙、关键、于晓涵、黄勇著，陈小龙统稿，薛永华、汪兴海、刘宁波、王国庆、赵志坚、丁昊、董云龙、张林、周伟、张海、苏宁远、陈宝欣、牟效乾、裴家正等参与了试验数据的采集与处理工作，在此向他们表示感谢。特别感谢何友院士、龙腾院士、廖桂生教授、陶然教授对我们的研究工作所给予的指导、关心和帮助，以及为本书提出的宝贵意见和建议。书中引用了一些作者的论著及研究成果，在此也向他们表示深深的感谢。

本书难以覆盖所有方面，书中若有不妥之处，恳请读者批评指正。

联系人：陈小龙；E-mail：cxlcxl1209@163.com。

2023 年 8 月

目 录

第 1 章 雷达目标检测概述	1
1.1 雷达目标检测研究现状	1
1.1.1 雷达目标检测面临的难题	1
1.1.2 雷达目标统计检测	1
1.1.3 雷达目标特征检测	4
1.2 雷达动目标检测技术概述	5
1.2.1 经典动目标检测及杂波抑制方法	5
1.2.2 基于时频变换的动目标检测方法	6
1.2.3 动目标长时间积累检测方法	7
1.3 稀疏域动目标检测技术研究现状	9
1.3.1 稀疏表示技术研究概述及优势	9
1.3.2 稀疏域杂波特性分析及抑制	11
1.3.3 基于稀疏分解的动目标检测方法	12
1.3.4 稀疏时频分布技术	13
1.3.5 基于稀疏傅里叶变换的雷达动目标检测	15
参考文献	16
第 2 章 稀疏表示和雷达回波稀疏特性	23
2.1 稀疏表示基本原理	23
2.1.1 稀疏逼近与稀疏表示	23
2.1.2 常用的稀疏分解算法	24
2.2 目标时频分布 (TFD) 及稀疏性分析	27
2.2.1 目标信号稀疏特性的 TFD 分析方法	28
2.2.2 稀疏分解与时频分析	30
2.3 动目标时频分布模型	31
2.4 动目标雷达回波稀疏性分析	32
2.4.1 C 波段雷达海上动目标实测数据稀疏性分析	32
2.4.2 S 波段雷达海上动目标实测数据稀疏性分析	35
参考文献	38

第 3 章 基于稀疏优化的稀疏时频分析雷达目标检测方法	40
3.1 基于形态成分分析的杂波抑制和动目标检测方法	41
3.1.1 动目标信号的稀疏表示及形态成分分析	41
3.1.2 稀疏域杂波抑制与动目标检测方法	43
3.1.3 仿真与实测数据处理结果	46
3.2 短时稀疏分数阶表示域 (ST-SFRRD) 理论模型	52
3.3 ST-SFRRD 动目标检测方法	53
3.4 实测数据验证与分析	55
参考文献	59
第 4 章 基于 SFT 的稀疏分数阶表示域动目标检测方法	61
4.1 SFT 算法基础	61
4.1.1 稀疏信号的定义	61
4.1.2 SFT 算法的实现原理	62
4.2 SFT 算法流程	64
4.3 基于 SFT 的 SFRFT 动目标检测方法	65
4.3.1 SFRFT 的定义及原理	65
4.3.2 基于 SFRFT 的动目标检测流程	66
4.3.3 实验验证与分析	67
4.4 基于 SFT 的 SFRAF 动目标检测方法	69
4.4.1 SFRAF 的定义及原理	69
4.4.2 SFRAF 算法的性能分析	72
4.4.3 基于 SFRAF 的动目标检测流程	75
4.4.4 实验验证与分析	76
参考文献	79
第 5 章 基于自适应双门限 SFT 的雷达标动目标检测方法	81
5.1 信号模型	82
5.2 稳健 SFT (RSFT) 算法原理及不足	82
5.2.1 RSFT 原理	82
5.2.2 基于 SFT 和 RSFT 动目标检测的问题	83
5.2.3 仿真对比分析	84
5.3 ADT-SFT 算法原理	87
5.4 基于 ADT-SFT 的动目标检测	89
5.5 实验验证与分析	91
5.5.1 仿真分析	91

5.5.2 实测数据处理	92
5.5.3 检测性能分析	98
5.5.4 算法复杂度分析	99
参考文献	100
第 6 章 稀疏分数阶表示域杂波抑制和动目标检测.....	102
6.1 RSFRFT 雷达动目标检测算法.....	102
6.1.1 RSFRFT 原理	103
6.1.2 杂波背景下 RSFRFT 动目标检测方法	105
6.1.3 实验验证与分析	106
6.2 SFRAF 自适应杂波抑制和动目标检测算法	113
6.2.1 变换域自适应滤波算法原理	114
6.2.2 SFRAF 域自适应滤波算法	115
6.2.3 SFRAF 域杂波抑制和动目标检测方法	116
6.2.4 实验验证与分析	117
参考文献	128
第 7 章 稀疏长时间相参积累动目标检测方法.....	129
7.1 雷达长时间积累概念与内涵	130
7.1.1 正交波形 MIMO 雷达观测模型	130
7.1.2 长时间观测目标回波模型	131
7.1.3 检测前跟踪 (TBD) 长时间积累	137
7.1.4 先检测后跟踪 (DBT) 长时间积累	137
7.1.5 常见长时间积累处理方法	138
7.2 Radon 高阶相位变换长时间相参积累动目标检测	140
7.2.1 Radon-FRFT 长时间相参积累	141
7.2.2 相位差分 Radon-Lv 分布长时间相参积累	146
7.2.3 LTCI 算法的局限和不足	157
7.3 Radon 稀疏变换 LTCI 动目标检测	157
7.3.1 Radon 稀疏变换长时间相参积累	157
7.3.2 稳健稀疏长时间相参积累	158
7.4 降维解耦非参数搜索 LTCI 动目标检测	163
7.4.1 非均匀采样尺度变换 LTCI 动目标检测	163
7.4.2 时间反转二阶 KT 变换 SLTCI 动目标检测	165
7.5 LTCI 域目标与杂波特征差异虚警点剔除技术	178
7.5.1 同一单元杂波与动目标变换域能量聚集性	179

7.5.2 跨距离单元杂波与动目标 LTCI 域能量聚集性	180
参考文献	185
第 8 章 基于稀疏表示的阵列雷达空距频聚焦处理	189
8.1 频控阵 MIMO 雷达原理	190
8.1.1 频控阵 MIMO 雷达阵列结构设计及波束形成	190
8.1.2 频控阵 MIMO 雷达距离—角度联合参数估计	191
8.2 频控阵雷达空距频聚焦 (SRDF) 理论与方法	192
8.2.1 SRDF 处理架构	192
8.2.2 基于稀疏表示的 SRDF 处理流程	193
8.3 仿真与分析	197
8.3.1 噪声背景下的仿真分析	197
8.3.2 杂波背景下的仿真分析	200
8.3.3 性能分析	202
参考文献	204
第 9 章 回顾与展望	207
9.1 内容回顾	207
9.2 研究展望	209
9.2.1 稀疏表示与新体制雷达信号处理	209
9.2.2 稀疏表示与高分辨成像	210
9.2.3 稀疏表示与深度学习	211
9.2.4 稀疏表示与目标识别	211
参考文献	212
附录 A 雷达数据库与海杂波抑制	214
A.1 加拿大 IPIX 数据库	214
A.1.1 雷达探测环境	214
A.1.2 雷达参数	214
A.1.3 数据介绍	215
A.2 南非 CSIR 数据库	215
A.3 海军航空大学导航雷达数据库	217
A.4 稀疏域雷达海杂波抑制与目标检测	219
附录 B 缩略语对照表	222

第1章 雷达目标检测概述

1.1 雷达目标检测研究现状

1.1.1 雷达目标检测面临的难题

雷达作为目标探测的主要手段，在环境监视和预警探测等民用和军事领域发挥着重要的作用。然而，受目标复杂运动特性和复杂背景环境的影响，目标回波不同程度地表现出低可观测特性，增大了雷达探测的难度。复杂背景下低可观测目标的有效检测已成为雷达技术领域的世界性难题^[1]，具体表现为：① 目标特性复杂，种类多样，包括“低、慢、小、快、隐”等多种类型，表现出不同的雷达散射特性和多普勒特性，检测难度大^[4]；② 雷达探测环境复杂，背景杂波认知难度大（地杂波、海杂波、气象杂波等），杂波对目标检测产生不利影响，强杂波极易淹没目标回波信号，并形成大量类似于目标的尖峰信号，如海尖峰，严重影响雷达对低可观测目标的探测性能；③ 雷达观测范围广，回波数据量大，新体制雷达如相控阵雷达、泛探雷达、多输入多输出（Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO）雷达^[10]等，多采用数字化阵列等技术，在提高信号采样质量的同时进一步增加了数据量，从而对算法的运算效率和系统实时性提出了更高的要求。因此，迫切需要研究新型低可观测目标检测理论和方法，以适应复杂环境和目标特性带来的挑战。

低可观测目标回波信杂/噪比（Signal-to-Clutter/Noise Ratio, SCR/SNR）低，且呈现出非均匀和非平稳特性^[11]。为了有效抑制杂波、提高目标回波的SNR/SCR，现代雷达普遍采用了大系统带宽的高分辨雷达体制，以提高对目标精细化描述的能力，但在目标探测方面还存在较多的问题：对慢速微弱目标探测与鉴别的能力相对较弱；针对隐形目标的探测能力尚显不足；对地和对海观测时，杂波幅度强、抑制效果差；大带宽和高数据量带来的运算量显著增加；多利用回波信号的幅度和多普勒信息，对目标的精细化描述能力差等。因此，研究高分辨率、大数据量、自适应及适用于非平稳信号的处理方法和手段，对雷达标动目标探测性能的提升具有重要意义。

1.1.2 雷达目标统计检测

一般情况下，噪声均作为随机信号看待，而由于杂波的似噪声性，一般都将

杂波条件下的目标检测问题视为统计检测理论范畴的问题。通常做法是将海杂波建模为各种统计分布，然后做统计假设检验，目标检测问题便可归结为一个二元假设检验问题，传统的二元信号假设检验采用基于似然比的假设检验方法，方法流程如图 1.1 所示^[12]。在计算似然比函数时，经典的目标检测方法根据不同的实际情况对目标信号、杂波与噪声做不同的假设，从而形成多种不同的最佳检测系统，如相关检测器、匹配滤波器等。图 1.1 中的门限判决主要采用贝叶斯、极小极大或尼曼—皮尔逊等准则进行选取。在处理过程中，传统的目标检测方法是对待检测信号的时域（或频域）幅度进行建模与处理，利用目标与杂波在时域（或频域）中的位置或幅度差异进行区分，此类检测方法可归为能量检测器范畴，因此传统目标检测器的性能受 SCR/SNR 的影响较大，在信杂（噪）比较低时，能量检测器通常不具有良好的目标检测性能。

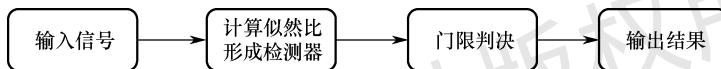


图 1.1 经典雷达目标检测流程图

半个多世纪以来，雷达目标检测方法的研究基本上都是基于统计理论的，即将回波信号视为随机序列，采用统计模型对杂波幅度建模，然后从杂波中提取各种统计特征构造能量检测器，以实现目标检测。但是，雷达目标检测研究发展至今，待检测目标与目标所处的环境都已相当复杂，目标和杂波模型均呈多样化发展趋势，尤其是杂波分布模型，在现代目标检测的复杂环境中往往不成立或者不完全成立，这就使得经典雷达目标检测方法因模型失配而不能取得预期的检测结果。另外，雷达目标检测所面临的是种类繁多的杂波与干扰，由它们构成的环境往往是非线性的、时变的，尤其是随着雷达自身技术的发展，如新体制的采用、分辨率的提高等，回波信号变得非平稳、非高斯。此时，经典雷达目标检测方法所做的独立、线性、平稳、高斯背景等假设不成立，或者不完全成立，原来设计的最佳目标检测策略的性能必然下降。

经典的雷达低可观测目标检测理论，尤其是杂波背景下的雷达目标检测理论，是建立在杂波是随机过程的基础上的，杂波的统计模型研究时间最长、发展最成熟，同时又是最基本的一种杂波模型。但是，杂波的产生通常依赖于诸多因素，如海杂波，包括雷达的工作状态（入射角、发射频率、极化、分辨率等）和环境状况（如海况、风速、风向等）。随着基于统计理论的目标检测技术不断向深化、复杂化方向发展，新出现的统计模型更贴近实际，但都是针对特定背景或者特定环境的，而且提出的越来越复杂的检测方法带来的是实时性的急剧降低或者缺乏可实现性。

雷达目标检测技术在实际应用过程中面临的背景并不是三类背景（即均匀背景、杂波边缘背景和多目标环境）中的任意单一类型，而是由海面、岛屿、陆

地、其他目标、强散射点距离旁瓣以及不同海情等形成的、涵盖三类背景类型的复杂非均匀环境，这就使得基于统计模型的常规目标检测技术面临两难的参数选择问题。基于背景杂波统计分布的雷达目标检测方法的典型代表是恒虚警检测器（Constant False Alarm Rate, CFAR），根据杂波的分布模型可分为高斯杂波模型与非高斯杂波背景模型下的 CFAR 检测器；根据数据处理方式的不同可分为参量型与非参量型 CFAR 技术；根据数据处理域的不同可分为时域 CFAR 技术和频域 CFAR 技术；根据数据形式的不同又可分为标量 CFAR 算法与向量 CFAR 算法。另外，还可分为单参数 CFAR 算法与多参数 CFAR 算法、单传感器与多传感器 CFAR 算法^[12]。

CFAR 检测技术在形成检测门限时一般包括两个步骤：一是估计背景均值，二是计算门限因子。这两个步骤很大程度上都依赖于对背景杂波类型的假设。其中，在 CFAR 要求下，门限因子的计算依赖于对背景杂波统计分布类型的假设，但是在目前的工程实际应用中，很难获得复杂非均匀环境下每个距离单元背景杂波的统计分布类型，因此也很难根据设定的虚警概率来求得门限因子。在估计背景均值时，传统 CFAR 检测方法总是基于背景类型的某个假设来获取足够的独立同分布样本。例如，工程中常用的单元平均 CFAR（Cell average-CFAR, CA-CFAR）方法基于均匀背景假设，相应的检测单元背景均值是用邻近距离单元的样本均值来估计的；选大 CFAR（Greatest Of-CFAR, GO-CFAR）方法则基于杂波边缘背景假设，相应的检测单元背景均值是通过选择两侧邻近距离单元样本均值中的较大者来估计的；选小 CFAR（Smallest of-CFAR, SO-CFAR）方法则基于单边有多目标的背景假设，相应的检测单元背景均值是通过选择两侧邻近距离单元样本均值中的较小者来估计的。然而，在实际雷达工作环境中，多数是针对复杂非均匀环境的。这种复杂非均匀环境使得基于单一背景类型假设设计的 CFAR 检测算法难以获得足够的独立同分布样本来进行背景均值估计，同时保护距离单元数和参考距离单元数的设置往往面临着两难问题。

因此，经典的目标检测方法在复杂的目标检测环境和日益提高的现代目标检测要求下，越来越显得捉襟见肘，主要表现在两个方面：① 难以适应现代多样化的目标信号模型；② 对目标检测环境的时变性、非平稳性考虑不足，当杂波分布类型偏离假设时，检测器的性能往往大幅下降，甚至难以保持 CFAR 性能。

在相干雷达脉冲体制下，自适应类检测算法将海杂波建立在某种特定的统计模型下^[13]，发展出了一系列对应于该模型的最优或近最优检测器，自适应检测方法流程图如图 1.2 所示^[14]。经典方法有广义似然比检测器（Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT）和自适应匹配滤波（Adaptive Matched Filter, AMF）检测器等。自适应检测方法适用于短时相干累积，主要用于搜索或扫描模式下的广域警戒雷达和监视雷达，因为要兼顾扫描效率，所以通常在一个波位驻留时间内，可积累的脉冲数有限。然而，当目标速度较低时，目标回波往往会淹没在强杂波

中，这时需要长时间的观测，采用提高积累脉冲数的办法改善信杂比，因此对于微弱目标检测，自适应检测方法性能存在较大程度的下降。

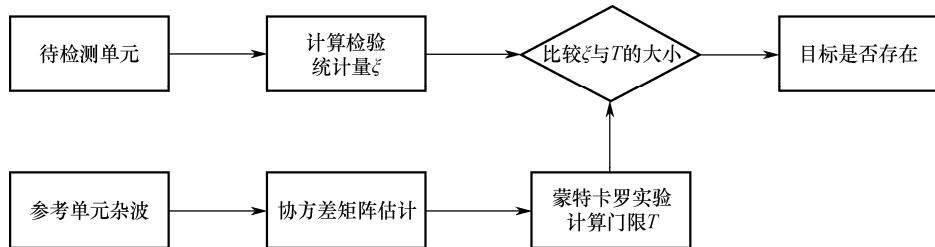


图 1.2 自适应检测方法流程图

1.1.3 雷达目标特征检测

采用杂波和目标回波的一个或多个差异性特征实现联合检测的方法，称为基于特征的检测技术，简称特征检测技术^[14]。海杂波背景下基于多特征的检测方法通过对雷达和目标回波提取具有差异性的特征，将杂波与目标高重叠的观测空间降维到低重叠的特征空间，在特征空间中对目标进行检测。图 1.3 所示为特征检测方法的流程图。

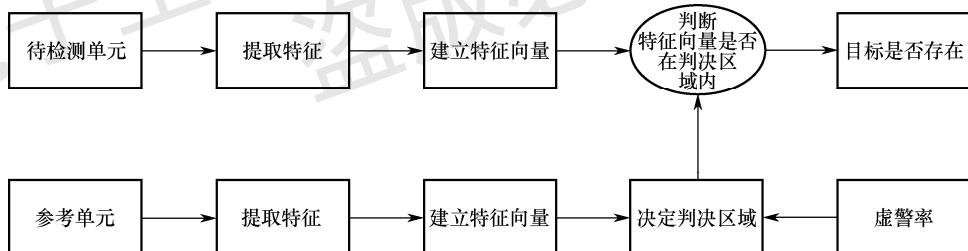


图 1.3 特征检测方法的流程图

传统杂波中的目标检测技术研究主要依赖于某种统计特征，且期望所提特征对杂波和目标具有稳定的差异度和线性可分性，但这一研究过程未系统全面地考虑两个方面的因素：① 背景杂波是一个多参数函数，即雷达系统参数（包括雷达频段、极化方式、脉冲重频、掠射角、观测距离、分辨单元尺寸、扫描速度、发射波形等）和环境参数（包括海域、海况、风速、风向、云雨、大气与海洋温度等）的函数，杂波与诸多参数间表现为复杂的非线性依赖关系，且依各参数呈现出不同的非线性规律，这些信息对增强不同频段杂波与目标特征差异度是十分有益的，但在形成统计特征过程中未被充分利用；② 存在目标时，目标与杂波间不是简单的线性叠加关系，而是复杂的非线性合成关系，但在线性近似或模型简化的过程中往往损失部分信息，导致仅有局部信息用于区分杂波和目标，实

际上这种非线性关系往往会使杂波与目标间存在一种非线性可分的状态。

对低可观测目标进行检测时，判断目标的有无其实是对目标和杂波或噪声进行分类，特征检测器就基于这样的思想，即判断回波是否属于背景所在的类。大致的思路是提取出目标回波和背景杂波之间稳健的、具有可分性的特征空间，根据特征的差别做出判别。基于这种架构，有些研究人员设计了目标检测的创新方法。最典型的方法是利用目标和杂波背景的非线性特征差异设计检测器，非线性特性是杂波复杂性的直观体现，相关文献已分别从散射机理和实测数据等方面研究了杂波的非线性特性，尤其是海杂波^[15]。从内容上看，非线性是对传统统计分布特性的补充和完善，它们是研究同一问题的不同数学工具。分形属于非线性特性研究领域的典型内容，它主要研究杂波的起伏结构。分形模型可以较好地描述信号的粗糙程度，背景与目标的粗糙程度不同，其分形特征有所差异，因此可将该差异用于目标检测。然而，时域分形差异特征在低 SNR/SCR 条件下不明显，检测性能下降。为此，有学者研究了变换域中的非线性特征检测方法，将回波信号进行相参积累后构造非线性特征差异，提高了该类检测方法对低可观测目标的检测能力，但对回波时间序列的长度和训练数据的数据量具有很高的要求，极大地增加了算法复杂性，且变换域非线性特征的理论机理尚不完备，仅适合特定条件下的数据分析和目标检测。

随着特征的增多，我们能够更全面地反映目标和杂波的差异性，且利用机器学习算法对高维特征空间进行目标检测的方法也被人们相继提出，极大地提高了检测性能。随着特征数量的增多，单一特征检测会造成一定的性能损失，联合多特征进行检测是大势所趋。然而，联合多特征检测中如何确定检测门限成了多特征检测的难题。

1.2 雷达动目标检测技术概述

1.2.1 经典动目标检测及杂波抑制方法

对于雷达动目标，往往利用多普勒信息对其进行积累检测。高速动目标，例如飞机、导弹等，其回波信号多具有较大的多普勒频移，而杂波通常处于静止或者慢速运动状态，其能量主要集中在低频段，用相应的低通滤波器对回波信号进行处理，慢速杂波的能量就能被有效滤除。这种利用径向速度差异抑制杂波的方法称为动目标显示（Moving Target Indication, MTI）^[16]。MTI 通常仅利用少数几个脉冲即可实现，具有计算简单的优点，但其无法对目标的速度进行估计。通过在 MTI 后面串接一个窄带多普勒滤波器组来覆盖整个重复频率的范围，从而达到动目标检测的目的，即为经典的动目标检测（Moving Target Detection, MTD）^[17]。MTD 利用杂波和目标多普勒频率的差异从杂波中检测目

标，同时能够根据滤波器的输出计算出多普勒频移来估计目标的径向速度。然而，当背景杂波较强时，杂波谱在多普勒域中有一定的展宽，导致动目标的多普勒频率淹没在杂波谱内，此时采用 MTI 和 MTD 技术对动目标进行检测将变得十分困难^[18]。此外，MTD 方法基于傅里叶变换（Fourier Transform, FT）实现，其形成的多普勒滤波器组仅适用于分析平稳的匀速运动目标，而对运动特性复杂的动目标，经 MTD 处理后的回波频谱将跨越多个多普勒单元，能量发散，难以在单一多普勒通道内形成峰值，检测性能下降。

1.2.2 基于时频变换的动目标检测方法

对于运动目标，其多普勒频率与运动速度近似为线性关系，匀加速、变加速等高机动目标的回波均体现为对多普勒的调制，可建模为频率调制（Frequency Modulation, FM）信号。FM 信号最显著的特点就是频率随时间变化，具有时变特性。时频变换方法将一维频域处理扩展为时间—频率二维处理，能够反映多普勒频率随时间的变化，是分析时变信号的有力工具。时频变换整体上可分为线性变换和非线性变换两种类型。典型的线性时频变换方法包括短时 FT（Short-time FT, STFT）^[19]和小波变换（Wavelet Transform, WT）^[20]等。STFT 在快速 FT（Fast FT, FFT）的基础上加上一个长度恒定的滑动时间窗函数，可以得到信号的时频分布（Time-Frequency Distribution, TFD），但是受不确定原理的制约，其时间分辨率和频率分辨率不能同时得到优化。WT 采用可调的时频窗，较好地解决了时间分辨率和频率分辨率的矛盾，但在实际中小波基的选取较为困难，分解层数也需要预先设置，而且分解的细节系数中很可能包含部分目标信息，导致 SCR 损失。在非线性变换方法中，最典型的是 Wigner-Vill 分布（Wigner-Vill Distribution, WVD）^[21]，它定义为信号自相关函数的傅里叶变换，对非平稳信号具有良好的时频聚集性，但由于 WVD 是一种二次型时频分布，当输入信号为多分量信号时，产生的交叉项将严重干扰目标的检测。平滑伪 WVD（Smoothed Pseudo WVD, SPWVD）^[22]通过对 WVD 施加窗函数和平滑函数，可以有效地抑制交叉项，但其时频聚集性下降，且运算量大，在实际工程中的应用受限。

以 FT 为核心的理论体系在处理平稳信号时显示出了极佳的性能，但雷达低可观测动目标的 SCR 低，回波信号常呈现出时变、非平稳、非均匀等复杂特性，FT 理论体系在用于雷达目标探测领域时遇到了新的挑战。作为 FT 的广义形式，分数阶傅里叶变换（Fractional FT, FRFT）^[23, 24]对线性调频（Linear FM, LFM）信号具有良好的能量聚集性，能够实现介于时域和频域之间的任意分数域表征，适合于处理时变的非平稳信号，且无交叉项的干扰，引起了信号处理领域的广泛关注，大批学者对基于 FRFT 的理论体系展开了系统而深入的研究^[25]。在雷达动目标检测方面，陈小龙等人^[32]针对海上动目标回波 SCR 低、难以有效积累

等问题，研究了分数域海杂波抑制与动目标检测方法，采用 FRFT 谱^[18]及短时 FRFT（Short-Time FRFT, STFRFT）对目标信号匹配增强，实现了时变非平稳信号的高分辨时频表示。

基于时频变换的雷达动目标检测方法实质上是时间和多普勒维对 MTD 方法的扩展，能够提升雷达对非平稳信号的处理性能。但是，该类方法多为参数搜索类方法，例如 FRFT 需要对变换角进行匹配搜索，运算效率难以满足实际要求，且参数估计精度受时频分辨率和搜索步长的限制。此外，若变换方法与目标运动特性不匹配，则相参积累增益低，难以达到显著改善 SCR 的效果。

1.2.3 动目标长时间积累检测方法

在雷达目标检测中，可以通过延长积累时间来增加目标能量，改善信号的 SCR/SNR，从而提高对动目标的检测性能，也就是通常所说的长时间积累^[33, 34]。数字相控阵雷达和 MIMO 雷达的发展，为目标的长时间积累提供了可能性。根据积累时是否利用了信号的相位信息，可将长时间积累方法分为非相参积累和相参积累两类。非相参积累方法因对 SCR/SNR 的改善效果不明显，多数不适用于复杂背景下的动目标检测问题。目标的高速运动和高机动性（加速、高阶运动及转动等）会导致雷达回波在积累时间内产生距离徙动（Range Cell Migration, RCM）和多普勒徙动（Doppler Frequency Migration, DFM）效应^[35]，使得目标能量在距离维和多普勒维均发散，传统相参积累方法，如基于单个距离单元的 MTD，积累增益和检测性能严重下降^[39, 40]。而长时间相参积累方法能够有效地完成 RCM 和 DFM 补偿，极大地提高目标信号的积累增益，进而提高雷达对低可观测动目标的探测能力。图 1.4 所示为南非科学与工业研究中心（Centre of Scientific and Industrial Research, CSIR）对海雷达数据库（见附录 A）中 TFC17-006 数据进行的分析，即海上动目标的距离和多普勒徙动，其中图 1.4(a)所示的距离一时间图表明雷达观测时间为 100s，观测范围约为 45 个距离单元，仅通过幅度难以从强海杂波中发现目标。图 1.4(b)所示为目标距离徙动、GPS 轨迹和多项式拟合曲线，可知目标在观测时间内跨越了多个距离单元，具有高机动特性。进一步分析回波的时频谱图〔见图 1.4(c)〕，可以看出目标多普勒频率随时间变化，近似有周期振荡性，海杂波频谱较宽，覆盖了大部分目标频谱。因此，目标回波能量在距离维和多普勒维均发散，需要进行补偿，以提高相参积累增益。

目前，根据目标运动特征的不同，长时间相参积累方法大致可分为以下三类（见图 1.5）^[41]：① 第一类方法基于匀速运动模型，即假设目标在积累时间内作匀速运动。典型方法包括 Radon FT（RFT）^[42]、Keystone 变换（Keystone Transform, KT）^[43, 44]、时间序列反转变换^[45]、变尺度逆 FT^[46]等，其中 RFT 和 KT 使用最广泛，二者分别通过距离一速度维联合搜索和尺度变换进行 RCM 补偿。

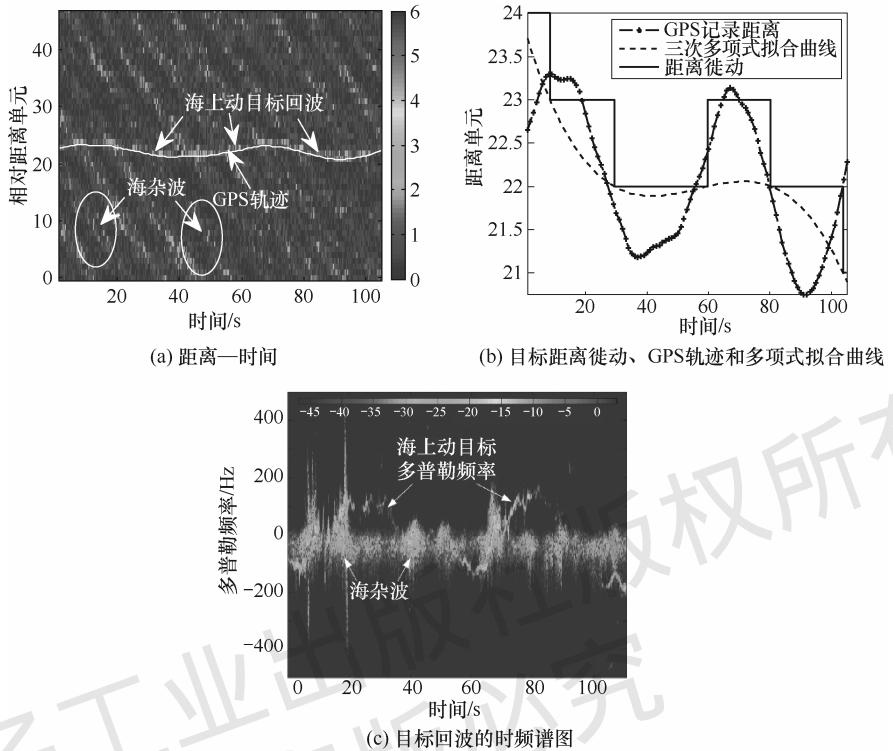


图 1.4 海上动目标的距离和多普勒徙动 (X 波段 CSIR 雷达数据)

但是，此类方法仅能消除 RCM 效应而无法对 DFM 进行补偿。② 第二类方法基于匀加速运动模型，典型方法包括 Radon FRFT (RFRFT)^[47]、Radon Lv 分布 (Radon Lv's Distribution, RLVD)^[48]、Radon 线性正则变换 (Radon Linear Canonical Transform, RLCT)^[49]等，可用于空中高速高机动目标及海上微弱动目标的检测。③ 第三类方法考虑了目标的急动度，基于变加速运动模型，如广义 RFT (Generalized RFT, GRFT)^[50]、相邻互相关函数 (Adjacent Cross Correlation Function, ACCF)^[51]、Radon 线性正则模糊函数 (Radon Linear Canonical Ambiguity Function, RLCAF)^[52]、离散多项式相位变换 (Discrete Polynomial-Phase Transform, DPPT)^[53]等方法。其中，GRFT 通过多维联合搜索可以获得最优的积累性能，但运算量较大；基于 ACCF 的积累方法计算复杂度最低，但需要以牺牲积累增益和检测性能为代价；而基于 DPPT 的积累方法需要在相参积累性能和计算复杂度之间进行折中。另外，分步徙动校正法也是一类有效的长时间相参积累方法，例如采用广义 KT 和去斜方法分别对距离和多普勒徙动进行分步补偿^[38]，但该类方法的问题是后续多普勒徙动补偿的效果受距离徙动补偿结果的影响。此外，无变换参数搜索法也是该领域的热点研究方向，这种方法可直接将目标的运动特征体现在设计的变换域中，以提高参数估计精度^[2]。

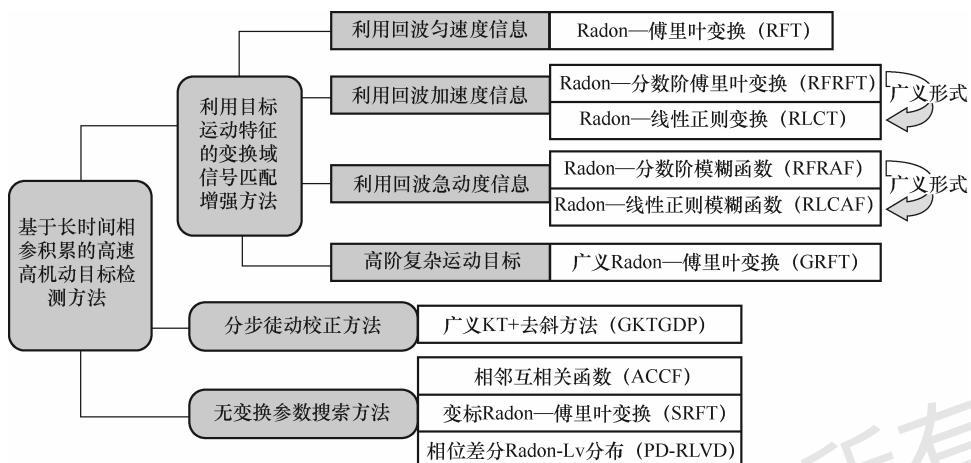


图 1.5 基于长时间相参积累的高速高机动目标检测方法

时频变换类和长时间相参积累等方法极大推动了雷达动目标检测理论和应用的发展，但在复杂探测环境下，性能仍有待改进，主要体现如下：① 积累和检测方法的通用性差，处理过程复杂，参数和影响因素多；② 需要大量的回波脉冲做积累，多适用于凝视或重点观测模式，受目标运动及雷达资源的限制，需要权衡积累脉冲数和积累增益，如何利用有限的回波脉冲在短时观测条件下有效地提取目标的特征并用于检测，成为亟需研究的问题；③ 单一变换和处理方法难以有效应对复杂的目标运动特性。因此，仍需研究计算效率高、可靠性强、适用于复杂背景和多目标特性的信号分析方法。

1.3 稀疏域动目标检测技术研究现状

近年来，随着压缩感知（Compressive Sensing, CS）^[54]理论的发展，稀疏表示技术^[58]引起了国内外学者的广泛关注。这种技术的基本思想是，利用信号在某个域中的稀疏特性，采用少量的观测样本，通过求解最优化问题，在稀疏域中实现对信号的高分辨表示。稀疏表示技术在信号处理、图像处理、机器学习和计算机视觉等领域表现出了巨大的应用潜力，也为雷达探测技术提供了新的研究思路。此外，雷达体制的变革为信号的高分辨和精细化处理提供了硬件平台支撑，进而为雷达信号处理提供了新的途径。尽管稀疏表示方法能够突破采样定理的限制，具有高分辨、适合多类信号分析等优点，但用于复杂背景下的雷达标动目标检测时仍有很多问题亟待解决和研究。

1.3.1 稀疏表示技术研究概述及优势

CS 是信号获取与压缩重构的有效途径，它突破了采样定理的限制，且在压缩

后的信号中即使丢失了某几项，仍然可以很好地重构原始信号。因此，CS 理论在信号提取、雷达目标检测、成像和特征识别等领域有着广泛的应用前景。在将雷达信号映射到低维空间上后，仅在低维空间中提取少量的主采样值就能重构出原始数据，这种函数的数量远小于未知参数的情况对稀疏重构算法提出了很高的要求，于是 CS 算法的有效性就取决于稀疏重构算法的性能。在观测矩阵满足有限等距约束（Restricted Isometry Property, RIP）^[59]的条件下，由于 l_1 范数可以获得与 l_0 范数最小化问题一致的最优解，在当前的压缩感知算法中应用广泛。但是，基于 l_1 范数最小的凸优化方法的算法原理相对简单，例如基追踪（Basis Pursuit, BP）等。缺点是计算量大、收敛慢、运行时间长，且重构容易出现误差。贪婪算法是另一种典型的稀疏重构算法，它在重构速度上做了改进，但由于一般求解得到的是问题的局部最优解，其精度仍然不够准确。此外，还有非凸优化算法思想，如 Focal Underdetermined System Solver (FOCUSS) 算法及基于贝叶斯统计的反演算法等，它们通过引入一些合理的假设，重构精度更高。

稀疏表示技术^[58, 60]起源于压缩感知，是一种典型的线性表示方法（Linear Representation Methods, LRM）^[61, 62]。压缩感知理论突破了采样定理的限制，对噪声不敏感，且具有可压缩性的信号即使通过少量的观测值也能够重构原始信号^[64, 65]。作为压缩感知理论必不可少的前提条件，稀疏表示技术在信号处理、图像处理、机器学习和计算机视觉等领域有着广泛的应用前景^[65]。传统信号稀疏表示的研究一般都建立在某些正交变换基的基础上，如经典的 FT、离散 WT (Discrete WT, DWT)、离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 等^[67]。由于信号自身的构成可能错综复杂，采用单一空间正交基对信号进行稀疏表示往往不能取得较好的效果，这种建立在正交基上的信号分解方法具有一定的局限性。因此，一些学者开始考虑将信号投影到几个不同的组合正交基上，以获得更好的稀疏表达^[73]。实验表明，基于组合正交基的稀疏分解方法能够获得比单一基下更稀疏的表示结果，同时有效提高总体计算速度^[75]。上述稀疏表示方法已被广泛用于图像处理领域，但其对复杂信号，尤其是时频变化范围很广的信号，处理效果仍不理想。如何根据信号自身的特点，自适应地选择合适的基函数，最稀疏地表达信号，近年来引起了一些学者的极大研究兴趣。Mallat 最早提出了基于过完备字典的信号稀疏表示方法^[76]，其基本思想是，用过完备的冗余函数库取代基函数，成为过完备字典，将字典中的元素称为原子，此时字典的构成不再局限于正交基。目前信号在过完备字典下的稀疏表示研究主要集中在两个方面：一是如何构造符合信号特征的过完备字典，并提高过完备字典的普适性，字典的建立一般可以通过特定的线性变换或者从信号样本中进行学习^[77, 78]；二是如何设计合适的稀疏分解算法，以快速有效地实现信号的稀疏表示，稀疏分解优化算法大致可以分为贪婪算法^[79, 80]、约束优化策略^[81]、逼近算法^[82]、同伦算法^[83]等四类。

稀疏表示中的原子模型应尽可能好地逼近信号结构，然后进行稀疏求解以求

取系数，因此基于稀疏表示的信号分析方法也是参数模型分析方法的一种^[84]。作为一种新兴的信号处理方法，其在雷达信号处理方面具有很大的优势：① 对于多分量信号，通过稀疏分解能够实现信号分离，将多分量信号转化为单分量信号进行处理，从而避免交叉项的影响^[85, 86]；② 利用目标与杂波或噪声的稀疏性差异，在目标稀疏域抑制杂波或噪声，改善 SCR/SNR，有利于提高杂波或噪声干扰下微弱信号的检测性能^[87]；③ 基于信号稀疏表示的参数估计方法对频率具有超分辨能力，从而有利于描述目标的精细运动特征^[88]；④ 结合快速算法，能够降低运算量，提高运算效率^[89]。

1.3.2 稀疏域杂波特性分析及抑制

基于变换域的杂波抑制方法实质上利用了杂波在这些域中的稀疏性，但在这方面研究得更多的是从有效积累目标能量的角度来考虑的，而从回波信号特征的角度分析稀疏特性的研究尚未见报道。杂波回波在距离单元之间和多普勒单元之间存在相关性，因此隐含着固有的、稀疏的信息，可在某种空间基下或某个字典下稀疏表示，即可用包含杂波绝大部分信息的少数系数来稀疏表示杂波的本质特征，利用杂波的相关性进行稀疏表示和建模，可以达到抑制杂波的目的，提高对微弱运动目标的探测性能^[90]。

目前，已有不少学者意识到 CS 和稀疏表示理论在雷达信号处理与检测方面的重要性，美国等国家的知名大学如加州理工大学、斯坦福大学、莱斯大学、杜克大学等都成立了专门的课题组对信号稀疏性进行研究。“CS 理论在雷达、声呐和遥感中的应用（CoSeRa）”系列国际会议（由 IEEE 信号处理 SP 分会、航空 AEES 分会和 IET 承办）已举办了多届，涉及信号稀疏特性分析、高分辨成像、目标检测、阵列信号处理等内容，为提高雷达性能提供了新的思路。

国内关于稀疏表示的研究主要集中在稀疏重构理论算法研究、无线电、雷达信号检测、SAR 成像、遥感图像处理等方面。众多高校和科研机构也开始跟踪稀疏表示方面的研究，如清华大学、中国科学院电子所、西安交通大学、国防科技大学、西安电子科技大学、深圳大学等。目前，从已有的文献来看，稀疏域信号分析方法多用于噪声抑制：一方面是对含噪信号进行稀疏分解，分解为稀疏成分和其他成分，其中的稀疏成分是有用信息，其他成分被认为是噪声，再由信号的稀疏部分重建原始信号，达到恢复原始信号并去除噪声的效果；另一方面是从字典中选取适当的原子表示纯净信号，进而将纯净信号从含噪信号中分离出来。此外，采用训练的过完备字典线性组合对杂波进行建模并解决稀疏表示问题，能够提高杂波建模的准确性，从而改善杂波抑制能力。关于稀疏表示理论的基础研究还有许多亟待解决的问题，例如过完备字典的构建、稀疏分解方法的设计，以及优化计算、抑制杂波等。

1.3.3 基于稀疏分解的动目标检测方法

稀疏表示作为一种有潜力的信号处理工具，最早应用于图像处理领域^[93-100]。Mallat 提出的基于过完备字典的稀疏表示思想及匹配追踪（Matching Pursuit, MP）分解算法，开创了利用稀疏分解进行信号分析的新方向^[91]。由于通过稀疏分解能够得到贴近信号本质特征的稀疏表示，因此受到了国内外学者的广泛关注^[92]，该技术已在谱估计、波达方向（Direction Of Arrival, DOA）估计、雷达成像、盲源分离等领域取得了重要应用^[93]。稀疏分解可以灵活设计字典等参数，而且稀疏性有利于突出目标特征，使其与背景更加线性可分，为目标检测研究提供了新的思路^[98]。

在实际中，目标的运动状态复杂多样，例如海上低可观测目标。一方面，海杂波的存在降低了回波信号的 SCR；另一方面，由于海面波动以及目标本身推动力的作用或机动，目标不仅存在平动，而且绕参考点作三轴转动，导致回波的多普勒频率随时间非线性变化。因此，新的检测算法应能适用于时变和非平稳信号处理，提取信号的精细特征。图 1.6 给出了典型海上低可观测目标的回波特性，可知海杂波剧烈变化，海面目标受海况的影响具有时变特性，且 SCR 较低，表现为低可观测性，传统统计检测方法难以实现可靠检测。目标雷达回波可视为少数强散射中心回波的叠加，在某些表示域中回波具有稀疏特性。因此，采用稀疏表示方法分析低可观测目标信号并进行参数估计是非常适合的。

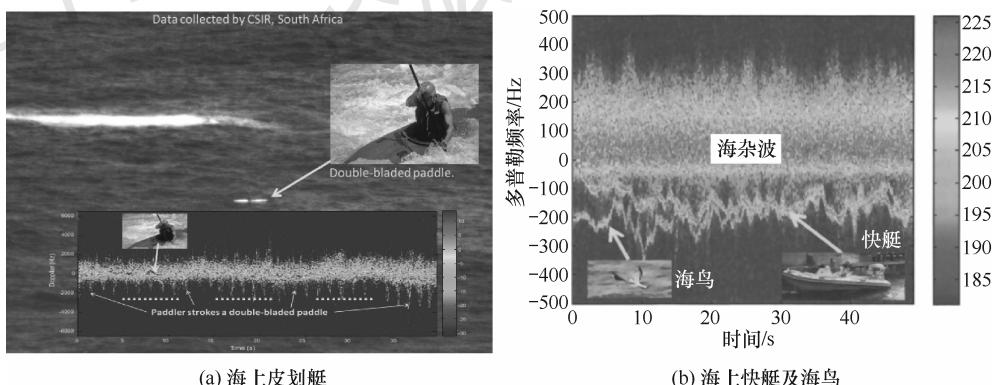


图 1.6 典型海上低可观测目标的回波特性

目前，已有一些学者从典型信号的稀疏分解方法入手，开展雷达目标检测、特征提取及分析等方面的研究，其优势表现在频率超分辨、无交叉项、抗噪性好等，从而有利于获得目标精细特征。北京电磁散射重点实验室王艳清等人^[103]以直升机的雷达散射截面积（Radar Cross Section, RCS）为研究对象，利用具有良好时频聚集性的 Gabor 函数构建过完备原子库并对信号进行优化分解，对分解得到的最佳匹配原子做 WVD 变换实现直升机旋翼的微动特性分析，在保持高时频分

分辨率的同时有效抑制了交叉项。西安电子科技大学周叶剑等人^[104]对平动补偿后的弹道目标回波信号进行局部分段，采用离散调频傅里叶变换（Discrete Chirp FT, DCFT）基对信号进行稀疏分解，并对微多普勒（Micro-Doppler, M-D）调频参数进行估计，在提高算法抗噪性能的同时降低了目标角闪烁效应对估计性能的影响，对弹道目标微动特性分析及识别具有一定的应用价值。全英汇等人^[105]利用目标多普勒的稀疏特性，通过构建多普勒频率远大于发射脉冲重复频率（Pulse Repetition Frequency, PRF）的过完备字典，并在优化分解的过程中抑制杂波，实现了无模糊的目标多普勒恢复。西安电子科技大学朱圣棋等人^[106]针对星载雷达高分辨、动目标检测数据量大的难题，提出了稀疏采样下多通道雷达动目标有效检测方法，并在机载雷达试验系统中得到了验证。罗迎等人^[107]利用目标“距离—慢时间”的复图像空间构造微多普勒信号原子集，并采用OMP分解法对微动特征进行提取。本书作者团队利用雷达回波信号组成成分的形态差异，分别构建适用于海杂波和微动目标信号的稀疏分解字典，使两个字典仅能对相对应的信号进行稀疏表示，能够更好地区分海杂波和微多普勒目标^[87]。

上述思路和方法对于基于稀疏分解的动目标检测方法具有示范作用。但是，在实际中，目标的运动状态复杂多样，尤其是低可观测目标具有不同的多普勒特性和雷达散射特性；此外，对于复杂回波信号，不仅包含时变的动目标，而且包含背景杂波，杂波与目标在时域和频域均有所交叠^[108, 109]。若用于稀疏分解的字典与目标特性不相匹配，则无法对动目标信号进行很好的稀疏表示，达不到通过稀疏分解来区分背景杂波和目标信号的目的，导致检测性能下降。如何通过深度学习等机器学习方法自适应地构造符合信号特征的过完备字典，并在保证精度的同时提高稀疏分解的效率，将是该领域研究的热点和难点。

1.3.4 稀疏时频分布技术

受目标运动和雷达资源的限制，需要权衡积累脉冲数和积累增益。于是，如何利用有限的回波脉冲在短时观测条件下有效地提取目标的特征并用于检测，就成为亟需研究的问题。信号时频处理方法在分析非平稳信号时具有一定的优势，但估计性能受时频分辨率的限制，而且若目标特性与变换方法不相匹配，则对信杂比的改善不明显。非平稳时变信号在时频域往往具有较好的稀疏性^[110]，受稀疏表示技术的启发，国内外一些学者将稀疏分解的局部优化思想引入时频分析，即采用稀疏时频分布（Sparse Time-Frequency Distribution, STFD）^[111]的方法对目标特性进行研究，能够有效提高信号时频聚集性和参数估计性能。

目前，该领域理论和应用较为完备的代表是美国麻省理工学院（MIT）的研究团队，该团队于2012年提出了稀疏傅里叶变换（Sparse FT, SFT），并且逐步发展了多个版本的快速算法。SFT是一种次线性算法，核心思想是通过“分筐”将N点长序列转换为B点短序列并做DFT运算，将傅里叶变换的计算复杂度由

$O(N \log N)$ 降至 $O(k \log N)$ (N 为信号长度, k 为稀疏度) [117-121]。尽管目前 SFT 算法存在很多不同的版本, 但整体上都遵循如图 1.7 所示的 SFT 理论框架。SFT 方法克服了传统 FFT 算法运算量随采样点线性增加的不足, 运算量近似保持线性增加, 极大提高了大数据量条件下的运算效率, 被评为十大信息处理技术之一, 主要应用在频谱感知、医学成像、图像检测和大数据处理等领域。图 1.8 所示为其开发的 SFFT 3.0 与 FFT 算法的运算量对比, 可以看出相比经典 FFT, SFFT 能够极大地降低运算量, 提高运算效率, 因此非常适合雷达信号的实时处理。然而, 该方法不能反映信号频率随时间的变化特性, 也不能处理具有高阶相位或高次调频的动目标信号。

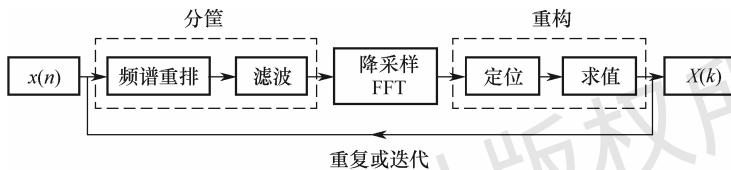


图 1.7 SFT 理论框架

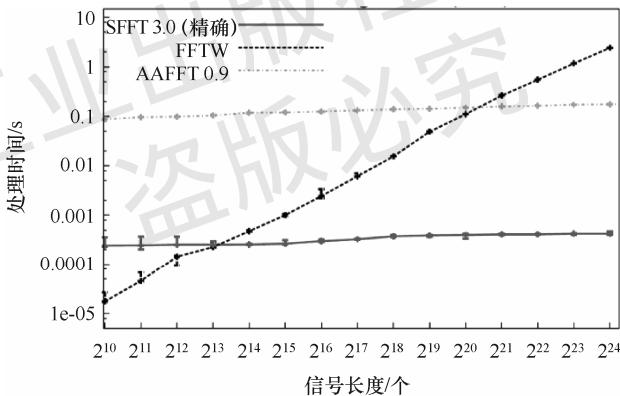


图 1.8 SFFT 3.0 与 FFT 算法的运算量对比 (美国 MIT 实验室)

目前, 一些学者已将 STFD 技术应用于非平稳信号的检测和特性分析方面。作者团队将 STFD 理论引入雷达动目标检测领域, 建立了短时 STFD (Short Time STFD, ST-STFD) 的原理模型, 在深入研究海杂波和目标信号实测数据稀疏特性的基础上, 提出了两种稀疏域微动信号特征提取和检测方法。Whitelonis 等人^[122]提出一种基于 WVD 和 CS 的联合时频分布方法对雷达信号进行分析, 在保证时频聚集性的同时有效减少了交叉项。文献[123]通过稀疏时频分析提高了信号瞬时频率的估计精度。图 1.9 给出了传统时频分析和稀疏时频分析技术的人体运动目标回波分析结果, 可以看出, 稀疏时频分析技术不仅能够获得高分辨的信号谱特征, 而且能很好地抑制背景杂波和噪声, 改善 SCR, 因此可用于雷达低可观测运动目标检测。

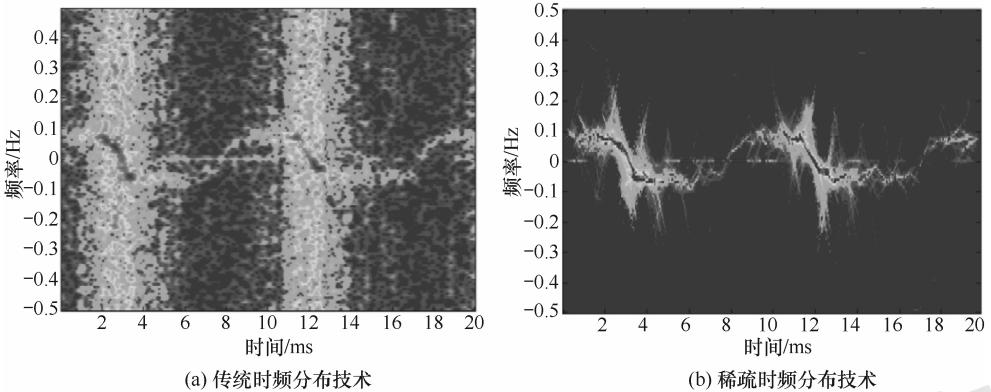


图 1.9 传统时频分析和稀疏时频分析技术的人体运动目标回波分析结果

STFD 方法能够突破采样定理的限制，具有时频聚集性好、抗杂波、适合多分量信号分析等优点，为雷达动目标检测提供了新的思路和方向。在分析雷达回波稀疏性的基础上，利用高分辨 STFD 技术以及局部优化理论和自适应优化算法，开发具有低复杂度的稀疏分解算法和自适应稀疏分解算法，降低相参积累算法的运算量，有望实现短时观测条件和有限脉冲条件下的动目标检测，可极大拓展算法的工程应用，进而提升雷达的动目标探测性能。

1.3.5 基于稀疏傅里叶变换的雷达动目标检测

SFT 方法已在频谱感知、图像检测、医学成像等领域取得了较好的应用效果，若能将其应用于雷达信号处理领域，则有望实现信号处理效率的有效提升^[124]。例如，张秀丽等人^[125]给出了 SFT 处理雷达信号时的数学表达式，并将其应用于雷达距离维解调和脉压，在计算速度方面优于传统算法，可以提高目标信号参数的估计速度。Pang 等人^[126]提出了一种基于 SFT 的动目标长时间积累检测方法，与传统 RCM 补偿方法相比具有计算复杂度方面的优势。刘升恒等人^[127]在 SFT 的基础上研究了稀疏离散 FRFT (Sparse Discrete FRFT, SDFRFT) 的理论框架（下文简称为 **SFRFT**），并提出了一种 DPPT 与 SFRFT 相结合的 LFM 信号快速参数估计方法，在取得良好估计性能的同时显著降低了计算量^[128]。

然而，SFT 方法仍存在如下两个方面的缺陷：一是，大多数 SFT 方法需要对信号的稀疏度进行预设，而在实际应用中，信号的稀疏度往往是未知的或者可能发生改变的；二是，SFT 在频域降采样后仅结合稀疏度和循环过程中频点出现的概率对大值系数进行估计，这在较低信杂噪比 (Signal-to-Noise and Clutter Ratio, SNCR) 的情况下难以保证重构信号的可靠性。因此，国内外学者从稀疏度预估、频域系数估值方式修正、闭式解推导等方面对 SFT 方法进行了改进^[129]。

其中, Wang 等人^[129, 132]提出的稳健 SFT (Robust SFT, RSFT) 算法为 SFT 理论在雷达目标检测中的应用开拓了新思路。RSFT 不需要已知信号稀疏度, 且在噪声背景中具有稳健的性能^[132]。但是, 该算法研究的是高斯白噪声背景中的检测问题, 利用事先计算好的噪声门限进行判决。而雷达目标检测通常面临杂波背景, 杂波往往强于噪声, 有时强出若干数量级, 如海杂波背景中的动目标检测。频域聚集形成的强杂波点增加了回波数据的稀疏度, 大大降低了算法对目标信号的重构性能。另外, SFT 和 RSFT 算法都是在重构目标信号多普勒的同时判决目标的有无, 该检测判决是在窗函数滤波降低了 SCNR 的情况下做出的, 就检测性能而言, 这种做法不利于杂波背景下的目标检测问题。因此, 仍需要研究能适应杂波背景的 SFT 类目标检测方法。

参 考 文 献

- [1] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.
- [2] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 30-38.
- [3] 何友, 黄勇, 关键, 等. 海杂波中的雷达目标检测技术综述[J]. 现代雷达, 2014, 36(12): 1-9.
- [4] 陈小龙, 关键, 等. 雷达低可观测动目标精细化处理及应用[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 19-27.
- [5] 陈小龙, 薛永华, 张林, 等. 机载雷达系统与信息处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2021.
- [6] Zuo L, Li M, Zhang X W, et al. An efficient method for detecting slow-moving weak targets in sea clutter based on time-frequency iteration decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3659-3672.
- [7] 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 空时频检测前聚焦雷达信号处理方法[J]. 雷达学报, 2014, 3(2): 129-141.
- [8] 陈小龙, 关键, 何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123-134.
- [9] 许稼, 彭应宁, 夏香根, 等. 基于检测前聚焦的临近空间高动态飞行器雷达探测研究[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 229-238.
- [10] Zheng N, Sun Y, Song X Y, et al. Joint resource allocation scheme for target tracking in distributed MIMO radar systems [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2019, 30(4): 709-719.
- [11] 陈小龙, 刘宁波, 黄勇, 等. 雷达目标检测分数域理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [12] 何友, 关键, 黄勇, 等. 雷达目标检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023.
- [13] 黄勇, 刘宁波, 陈小龙, 等. MIMO 雷达理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.
- [14] 许述文, 白晓惠, 郭子薰, 等. 海杂波背景下雷达目标特征检测方法的现状与展望[J]. 雷达学报, 2020, 9(4): 684-714.
- [15] 关键, 刘宁波, 黄勇. 雷达目标检测的分形理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [16] 宋杰, 何友, 关键. 一种双模杂波抑制的准自适应 MTI 系统[J]. 兵工学报, 2009, 30(5): 546-550.
- [17] 马晓岩, 袁俊泉. 基于离散小波变换提高 MTD 检测性能的仿真分析[J]. 信号处理, 2001, 17(2): 148-151.
- [18] Guan J, Chen X L, Huang Y, et al. Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2012, 6(5): 389-401.

- [19] Yonina C E, Pavel S, Dustin G M, et al. Sparse phase retrieval from short-time Fourier measurements [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(5): 638-642.
- [20] Gilles J. Empirical wavelet transforms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [21] Qazi S, Georgakis A, Stergioulas L K, et al. Interference suppression in the Wigner distribution using fractional Fourier transformation and signal synthesis [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(6): 3150-3154.
- [22] Yasotharan A, Thayaparan T. Time-frequency method for detecting an accelerating target in sea clutter [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1289-1310.
- [23] 陶然, 邓兵, 王越. 分数阶傅里叶变换及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [24] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 分数阶傅里叶变换在动目标检测和识别中的应用: 回顾和展望[J]. 信号处理, 2013, 29(1): 85-97.
- [25] Feng Q, Li B Z. Convolution and correlation theorems for the two dimensional linear canonical transform and its applications [J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(2): 125-132.
- [26] Tao R, Li X M, Li Y L, et al. Time-delay estimation of chirp signals in the fractional Fourier domain [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(7): 2852-2855.
- [27] Tao R, Zhang F, Wang Y. Fractional power spectrum [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(9): 4199-4206.
- [28] Tao R, Li Y L, Wang Y. Short-time fractional Fourier transform and its applications [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(5): 2568-2580.
- [29] 沙学军, 史军, 张钦宇, 等. 分数傅里叶变换原理及其在通信系统中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [30] Liu X P, Shi J, Xiang W, et al. Sampling expansion for irregularly sampled signals in fractional Fourier transform domain [J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 34: 74-81.
- [31] Shi J, Xiang W, Liu X P, et al. A sampling theorem for the fractional Fourier transform without band-limiting constraints [J]. *Signal Processing*, 2014, 98: 158-165.
- [32] Chen X L, Guan J, Bao Z H, et al. Detection and extraction of target with micro-motion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 1002-1018.
- [33] Xing M D, Su J H, Wang G Y, et al. New parameter estimation and detection algorithm for high speed small target [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1): 214-224.
- [34] 吴孙勇, 廖桂生, 朱圣棋, 等. 提高雷达成动目标检测性能的二维频率域匹配方法[J]. 电子学报, 2012, 40(12): 2415-2420.
- [35] Li X L, Sun Z, Yi W, et al. Computationally efficient coherent detection and parameter estimation algorithm for maneuvering target [J]. *Signal Processing*, 2019, 155: 130-142.
- [36] Huang S Q, Liu D Z. Some uncertain factor analysis and improvement in spaceborne synthetic aperture radar imaging [J]. *Signal Processing*, 2007, 87(12): 130-142.
- [37] Zhong H, Liu X Z. An effective focusing approach for azimuth invariant bistatic SAR processing [J]. *Signal Processing*, 2010, 90(1): 395-404.
- [38] Sun Z, Li X L, Yi W, et al. Detection of weak maneuvering target based on keystone transform and matched filtering process [J]. *Signal Processing*, 2017, 140: 127-138.
- [39] Li X L, Sun Z, Yeo T S, et al. STGRFT for detection of maneuvering weak target with multiple motion models [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2019, 67.

- [40] Huang P H, Liao G S, Yang Z W, et al. Long-time coherent integration for weak maneuvering target detection and high-order motion parameter estimation based on keystone transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(5): 4013-4026.
- [41] 陈小龙, 黄勇, 关键, 等. MIMO 雷达微弱目标长时积累技术综述[J]. 信号处理, 2020, 36(12): 1947-1964.
- [42] Xu J, Yu J, and Peng Y N, et al. Radon-Fourier transform (RFT) for radar target detection (I): generalized Doppler filter bank processing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 2011, 47(2): 1186-1202.
- [43] Li G, Xia X G, Peng Y N. Doppler keystone transform: An approach suitable for parallel implementation of SAR moving target imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 573-577.
- [44] Zhu D Y, Li Y, Zhu Z D. A keystone transform without interpolation for SAR ground moving-target imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1), 18-22.
- [45] Li X L, Cui G L, Yi W, et al. Sequence-reversing transformbased coherent integration for high-speed target detection [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1573-1580.
- [46] Zheng J B, Su T, Zhu W T, et al. Radar high-speed target detection based on the scaled inverse Fourier transform[J]. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2015, 8(3): 1108-1119.
- [47] Chen X L, Guan J, Liu N B, et al. Maneuvering target detection via radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(4): 939-953.
- [48] Li X L, Cui G L, Yi W, et al. Coherent integration for maneuvering target detection based on Radon-Lv's distribution [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(9): 1467-1471.
- [49] Chen X L, Guan J, Liu N B, at al. Detection of a low observable sea-surface target with micromotion via the Radon-linear canonical transform [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(7): 1225-1229.
- [50] Xu J, Xia X G, Peng S B, et al. Radar maneuvering target motion estimation based on generalized Radon-Fourier transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(12): 6190-6201.
- [51] Li X L, Cui G L, Yi W, et al. A fast maneuvering target motion parameters estimation algorithm based on ACCF [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(3), 270-274.
- [52] Chen X L, Guan J, Huang Y, et al. Radon-linear canonical ambiguity function-based detection and estimation method for marine target with micromotion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(4): 2225-2240.
- [53] Yu W C, Su W M, Gu H. Ground maneuvering target detection based on discrete polynomial-phase transform and Lv's distribution [J]. *Signal Processing*, 2018, 144: 364-372.
- [54] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [55] Baraniuk R G Compressive sensing [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(4): 118-121.
- [56] Candès E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 21-30.
- [57] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 压缩感知回顾与展望[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1651-1662.
- [58] Zhang Z, Xu Y, Yang J, et al. A survey of sparse representation: algorithms and applications [J]. *IEEE Access*, 2015, 3, 490-530.
- [59] Candés E, Tao T. Decoding by linear programming [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*,

- 2005, 51(12): 4203-4215.
- [60] 李清泉, 王欢. 基于稀疏表示理论的优化算法综述[J]. 测绘地理信息, 2019, 44(4): 1-9.
- [61] Natarajan B K. Sparse approximate solutions to linear systems [J]. *SIAM J. Comput.*, 1995, 24(2): 227-234.
- [62] Huang M. Brain extraction based on locally linear representation based classification [J]. *NeuroImage*, 2014, 92(5): 322-339.
- [63] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(2): 489-509.
- [64] Tsaig Y, Donoho D L. Extensions of compressed sensing [J]. *Signal Processing*, 2006, 86(3): 549-571.
- [65] Lu X Q, Li X L. Group sparse reconstruction for image segmentation [J]. *Neurocomputing*, 2014, 136(7): 41-48.
- [66] M. Elad, M. A. T. Figueiredo, Y. Ma. On the role of sparse and redundant representations in image processing [J]. *Proc. IEEE*, 2010, 98(6): 972-982.
- [67] S. Mallat. A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way [M]. New York, NY, USA: Academic, 2008.
- [68] J.-L. Starck, F. Murtagh, J. M. Fadili. Sparse Image and Signal Processing: Wavelets, Curvelets, Morphological Diversity [M]. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2010.
- [69] M. Elad. Sparse and Redundant Representations: From Theory to Applications in Signal and Image Processing [M]. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2010.
- [70] A. M. Bruckstein, D. L. Donoho, M. Elad. From sparse solutions of systems of equations to sparse modeling of signals and images [J]. *SIAM Rev.*, 2009, 51(1): 34-81.
- [71] Xu Y, Zhang D, Yang J, Yang J Y. A two-phase test sample sparse representation method for use with face recognition [J]. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, 2011, 21(9): 1255-1262.
- [72] J. Wright, Y. Ma, J. Mairal, et al. Sparse representation for computer vision and pattern recognition [J]. *Proc. IEEE*, 2010, 98(6): 1031-1044.
- [73] J. L. Starck, D. L. Donoho, E. J. Candès. Very high quality image restoration by combining wavelets and curvelets [C]. *Proceedings of SPIE*, 2001: 9-19.
- [74] M. Elad, A. M. Bruckstein. A generalized uncertainty principle and sparse representation in pairs of bases [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002(48): 2558-2567.
- [75] 邹建成, 车冬娟. 信号稀疏表示方法研究进展综述[J]. 北方工业大学学报, 2013, 25(1), 1-4.
- [76] S. Mallat, Z. Zhang. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41: 3397-3415.
- [77] R. Rubinstein, A. M. Bruckstein, M. Elad. Dictionaries for sparse representation modeling [J]. *Proc. IEEE*, 2010, 98(6): 1045-1057.
- [78] 黄晓生, 黄萍, 曹义亲, 等. 一种改进的基于 K-SVD 字典学习的运动目标检测算法[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(3): 5-8, 13.
- [79] 刘亚新, 赵瑞珍, 胡绍海, 等. 用于压缩感知信号重建的正则化自适应匹配追踪算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2713-2717.
- [80] Donoho D L, Tsaig Y, Drori I, et al. Sparse solution of underdetermined systemsof linear equations by stagewise orthogonal matching pursuit [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(2): 1094-1121.
- [81] Koh K, Kim S J, Boyd S. An interior-point method for large-scale l_1 -regularized logistic regression [J].

- Journal of Machine Learning Research*, 2007, 8: 1519-1555.
- [82] Zeng J S, Lin S B, Wang Y, et al. $l_{1/2}$ regularization: convergence of iterative half thresholding algorithm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(9): 2317-2329.
 - [83] Asif M S, Romberg J. Fast and accurate algorithms for re-weighted l_1 -norm minimization [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 61(23): 5905-5916.
 - [84] 李刚, 夏向根. 参数化稀疏表征在雷达探测中的应用[J]. 雷达学报, 2016, 5(1): 1-7.
 - [85] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨稀疏表示及其在雷达标定目标检测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 239-251.
 - [86] Xu J, Wang W, Gao J H, et al. Monochromatic noise removal via sparsity-enabled signal decomposition method [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 533-537.
 - [87] 陈小龙, 关键, 董云龙, 等. 稀疏域海杂波抑制与微动目标检测方法[J]. 电子学报, 2016, 44(4): 860-867.
 - [88] 罗倩. 基于稀疏表示的杂波建模和微弱运动目标探测[J]. 现代雷达, 2016, 38(2): 43-46.
 - [89] H. Hassanieh, P. Indyk, et al. Simple and practical algorithm for sparse Fourier transform [C]. *Proceedings of Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, ACM, 2012: 1183-1194.
 - [90] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨稀疏表示及其在雷达标定目标检测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 239-251.
 - [91] S. Mallat, Z. Zhang. Matching pursuits with time-frequency dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41: 3397-3415.
 - [92] 肖正安. 基于稀疏分解的LFM回波信号检测算法[J]. 湖北第二师范学院学报, 2016, 33(8): 8-11.
 - [93] Yang J G, Thompson J, Huang X T, et al. Random-frequency SAR imaging based on compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 983-994.
 - [94] Zhu S Q, Liao G S, Qu Y, et al. Ground moving targets imaging algorithm for synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 462-477.
 - [95] Zhao Y H, Zhang L R, Gu Y B, et al. An efficient sparse representation method for wideband DOA estimation using focus operation [J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2017, 11: 1673-1678.
 - [96] 赵永红, 张林让, 刘楠, 等. 采用协方差矩阵稀疏表示的DOA估计方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(2): 58-63.
 - [97] Yang Z C, Li X, Wang H Q, et al. On clutter sparsity analysis in space-time adaptive processing airborne radar [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1214-1218.
 - [98] 高仕博, 程咏梅, 肖利平, 等. 面向目标检测的稀疏表示方法研究进展[J]. 电子学报, 2015, 43(2): 320-332.
 - [99] 方明, 戴奉周, 刘宏伟, 等. 基于联合稀疏恢复的宽带雷达标定目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(12): 2977-2983.
 - [100] Laura A, Arian M, Matern O, et al. Design and analysis of compressed sensing radar detectors [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(4): 813-827.
 - [101] 严韬, 陈建文, 鲍拯. 一种基于压缩感知的天波超视距雷达短时海杂波抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 945-952.
 - [102] 罗迎, 张群, 王国正, 等. 基于复图像OMP分解的宽带雷达微动特征提取方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 361-369.
 - [103] 王艳清, 霍超颖, 殷红成, 等. 基于稀疏时频分解的空中目标微动特征分析[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(5): 32-37.
 - [104] 周叶剑, 张磊, 蒋毛, 等. 多频调频稀疏分解的微动目标参数估计方法[J]. 电子与信息学报

- 报, 2017, 39(10): 2360-2365.
- [105] 全英汇. 稀疏信号处理在雷达检测和成像中的应用研究[D]. 西安电子科技大学, 2012.
- [106] Zhu Sheng-qi, Liao Gui-sheng, Qu Yi, et al. Ground moving targets imaging algorithm for synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 462-477.
- [107] 罗迎, 张群, 王国正, 等. 基于复图像 OMP 分解的宽带雷达微动特征提取方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(4): 361-369.
- [108] Chen C, Li F, Ho S S, et al. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 2-21.
- [109] Chen C, David Tahmoush, and William J. Miceli. Radar micro-Doppler signature: processing and applications [M]. UK: IET, 2014.
- [110] Gotz E. Pfander and Holger Rauhut. Sparsity in time-frequency representations [J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2010, 16(2): 233-260.
- [111] Flandrin P, Borgnat P. Time-frequency energy distributions meet compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(6): 2974-2982.
- [112] Jokanovic B, Amin M. Reduced interference sparse time-frequency distributions for compressed observations [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(24): 6698-6709.
- [113] Gholami A. Sparse time-frequency decomposition and some applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3598-3604.
- [114] 陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 基于短时稀疏时频分布的雷达目标微动特征提取及检测方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1017-1023.
- [115] Zhao Z C, Tao R, Li G, et al. Fractional sparse energy representation method for ISAR imaging[J]. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2018, 12(9): 988-997.
- [116] 陈小龙, 关键, 于晓涵, 等. 雷达动目标短时稀疏分数阶傅里叶变换域检测方法[J]. 电子学报, 2017, 45(12): 3030-3036.
- [117] H. Hassanieh, P. Indyk, D. Katabi, et al. Nearly optimal sparse Fourier transforms [C]. *Proceedings of Annual ACM-SIAM Symposium on Theory of Computing*, ACM, 2012: 563-577.
- [118] H. Hassanieh, F. Adid, D. Katabi, et al. Faster GPS via the sparse Fourier transform [C]. *Proceedings of Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking*, ACM, 2012: 353-364.
- [119] *Sparse Fast Fourier Transform* [EB/OL]. [2019-08-31].
- [120] J. Schumacher. High performance sparse fast Fourier transform [D]. *Master's thesis, Computer Science, ETH Zurich, Switzerland*, 2013.
- [121] C. Gilbert A., Indyk P., Iwen M., et al. Recent developments in the sparse Fourier Transform: A compressed Fourier transform for big data [J]. *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 31, no. 5, pp. 91-100, 2014.
- [122] N. Whitelonis, H. Ling. Application of a compressed sensing based time-frequency distribution for radar signature analysis[C]. *2012 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2012.
- [123] Branka Jokanovic, Moeness G. Amin, Srdjan Stankovic. Instantaneous frequency and time-frequency signature estimation using compressive sensing [C]. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2013.
- [124] Chen X, Guan J, He Y, et al. High-resolution sparse representation and its applications in radar moving target detection [J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 239-251.
- [125] 张秀丽, 王浩全, 庞存锁. 稀疏傅里叶变换在雷达中的应用研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 148-152.

- [126] Pang C, Liu S, Han Y. High-speed target detection algorithm based on sparse Fourier transform [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 37828-37836.
- [127] Liu S H, Shan T, Tao R, et al. Sparse discrete fractional Fourier transform and its applications [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(24): 6582-6595.
- [128] 刘升恒. 稀疏分数阶变换理论及其在探测中的应用[D]. 北京理工大学, 2016.
- [129] Wang S, Vishal M P, and Athina P. RSFT: a realistic high dimensional sparse Fourier transform and its application in radar signal processing[C]. *Military Communications Conference, MILCOM 2016*, 888-893, 2016.
- [130] A. Rauh, G. R. Arce. Optimized spectrum permutation for the multidimensional sparse FFT [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(1): 162-172.
- [131] Chen G L, Tsai S, Yang K J. On performance of sparse Fast Fourier transform and enhancement algorithm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2017, 65(21): 5716-5729.
- [132] Wang S G, Patel V M, Petropulu A. A robust sparse Fourier transform and its application in radar signal processing [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(6): 2735-2755.