

## 高分辨稀疏表示及其在雷达动目标检测中的应用

陈小龙<sup>①</sup> 关键<sup>①</sup> 何友<sup>②</sup> 于晓涵<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(海军航空工程学院电子信息工程系 烟台 264001)

<sup>②</sup>(海军航空工程学院信息融合研究所 烟台 264001)

**摘要:** 复杂背景下稳健高效的低可观测动目标检测始终是雷达信号处理领域的研究热点和难点,一方面,强杂波背景和目标复杂运动使得信号微弱,时频域难以区分;另一方面,相参积累算法复杂,长时间积累运算量较大,如何利用有限的雷达资源提高雷达探测性能成为亟需解决的问题。高分辨稀疏表示技术从信号稀疏性角度出发区分杂波和动目标,是传统变换域目标检测技术的拓展,具有高时频分辨率、对噪声不敏感、稳健性高以及适于多分量信号分析的优势,有广阔应用前景。该文重点从应用角度进行归纳总结,系统回顾了雷达动目标检测的常规方法,然后对稀疏表示在雷达杂波特性分析、抑制、动目标检测、特征提取、时频分析等方面的应用进行了初步总结和归纳,对研究方向进行展望,最后结合实测数据和已有成果给出了部分处理结果。

**关键词:** 雷达目标检测; 低可观测动目标; 稀疏表示; 时频分析; 微多普勒; 稀疏时频分布(STFD)

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-283X(2017)03-0239-13

**DOI:** 10.12000/JR16110

**引用格式:** 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨稀疏表示及其在雷达动目标检测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 239–251. DOI: 10.12000/JR16110.

**Reference format:** Chen Xiaolong, Guan Jian, He You, *et al.* High-resolution sparse representation and its applications in radar moving target detection[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(3): 239–251. DOI: 10.12000/JR16110.

## High-resolution Sparse Representation and Its Applications in Radar Moving Target Detection

Chen Xiaolong<sup>①</sup> Guan Jian<sup>①</sup> He You<sup>②</sup> Yu Xiaohan<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

<sup>②</sup>(Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** To address difficulties in radar signal processing, the effective and efficient detection of low-observable moving targets in complex environments is an ongoing research hotspot. On the one hand, a signal may be extremely weak due to strong clutter and the complex motion of a target, making it hard to separate them in the time and frequency domains. On the other hand, complex coherent integration methods and the heavy computational burden of long-time integration represent challenges for improving radar detection performance with limited resources. High-resolution sparse representation can separate clutter from a moving target with respect to signal sparsity, and can be regarded as an extension of traditional transform-based moving target detection methods. This method has promising application prospects due to the advantages of its high time-frequency resolution, anti-noise property, robustness, and suitability for the analysis of multi-signals. In this paper, we systematically review conventional radar moving target detection methods. Then, we

收稿日期: 2016-09-29; 改回日期: 2017-02-21; 网络出版: 2017-03-24

\*通信作者: 陈小龙 cxlxl1209@163.com; 关键 guanjian96@tsinghua.org.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501487, 61401495, U1633122, 61471382, 61531020), 山东省自然科学基金(2015ZRA06052), 航空基金(20162084005, 20162084006, 20150184003), 中国科协“青年人才托举工程”和“泰山学者”专项经费

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501487, 61401495, U1633122, 61471382, 61531020), The Natural Science Foundation of Shandong Province (2015ZRA06052), The Aeronautical Science Foundation of China (20162084005, 20162084006, 20150184003), The Young Elite Scientist Program of CAST and Special Funds of Taishan Scholars

summarize their applications, including sparse representation in clutter property analysis, suppression, moving target detection, signature extraction, and time-frequency analysis. Next, we consider future developments. Finally, we provide some results based on real datasets and existing research.

**Key words:** Radar target detection; Low-observable moving target; Sparse signal; Sparse representation; Micro-Doppler; Sparse Time-Frequency Distribution (STFD)

## 1 引言

雷达作为目标探测和监视的主要手段,在空中和海面目标监视以及预警探测等公共国防安全领域应用广泛<sup>[1]</sup>。然而受复杂背景环境(陆地、城市、海洋等)以及目标复杂运动特性的影响,目标雷达回波极其微弱、特性复杂,具有低可观测性,使得雷达对动目标的探测性能难以满足实际需求。复杂背景下低可观测动目标的检测技术成为关键制约因素,也是世界性难题<sup>[2]</sup>。具体体现在<sup>[3-6]</sup>:(1)目标运动特性复杂,雷达低可观测动目标主要包括“低(低掠射角照射,杂波强)、慢(慢速目标,易受杂波遮蔽)、小(小尺寸目标,回波微弱)、快(高速高机动目标,能量发散积累效果差)、隐(隐身目标,回波微弱)”等;(2)强杂波极易湮没目标回波信号,并形成大量类似于目标的尖峰信号,严重影响雷达对弱小目标的探测和监视性能;(3)雷达观测范围广,回波数据量大,新体制雷达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,对算法的实时处理提出了极高的要求;(4)存在岛屿、岛礁、陆海交界、强点源干扰、多目标等复杂情况,需要很好地处理杂波边缘和多目标的情况。

在上述因素的综合影响下,动目标回波信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR)低,且呈现非平稳和非均匀特性,亟待发展和研究高时频分辨率、大数据量高效、自适应以及适用于多分量信号分析的方法和手段。迫切需要创新雷达动目标检测技术,提高强杂波以及目标复杂运动特性条件下的雷达动目标探测性能。

目前,基于信号稀疏特性的高分辨率表示技术引起了信号处理领域研究人员的广泛关注。该技术的基本思想是: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,在稀疏域中实现对该信号的高分辨率表示<sup>[7]</sup>。目前,随着压缩感知(Compressive Sensing, CS)和稀疏表示理论和技术的发展,高分辨稀疏表示处理技术得到了国内外学者的高度关注,在雷达成像、目标检测和识别等方面开展了多项有针对性的研究<sup>[8,9]</sup>。此外,雷达体制的变革为高分辨和信号精细化处理提

供了硬件平台支撑,从而为雷达信号处理提供了新的途径,具有广泛的应用前景。尽管稀疏表示分析方法突破采样定理的限制,具有分辨率高、对噪声不敏感、稳健性高等优点,但仍有很多问题亟待解决和研究。CS和稀疏表示理论内容系统性较强,本文结合目前国内外该领域的研究进展,重点从应用角度进行归纳总结,系统回顾了雷达动目标检测的常规方法,然后对稀疏表示在雷达杂波特性分析、抑制、动目标检测和特征提取等方面的应用进行了初步总结和归纳,对研究方向进行展望,最后结合实测数据和已有成果给出了部分处理结果。

## 2 雷达动目标检测技术概述

### 2.1 经典动目标显示及杂波抑制方法

雷达探测的目标,如飞机、导弹通常具有较高速度,接收信号会有较大的多普勒频移,而杂波由于处于静止或者处于较慢速的运动状态,能量主要集中在频率比较低的范围,用相应的带阻滤波器对回波信号进行滤波,杂波的能量就会被减弱甚至消除。这种利用径向速度的差别抑制无用杂波的方法称为MTI (Moving Target Indication, MTI)<sup>[10]</sup>。在MTI后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,以达到动目标检测的目的,即动目标检测(Moving Target Detection, MTD)<sup>[11]</sup>。由于杂波和目标的多普勒频移不同,它们将在不同的多普勒滤波器的输出端出现,从而可以从杂波中检测出动目标,并根据不同的窄带滤波器输出求出多普勒频移来确定目标的速度。

然而,在较强杂波干扰背景下,杂波在多普勒域有一定的谱宽,动目标的多普勒频率会落在杂波的频谱内,采用传统的MTI和MTD技术对动目标进行多普勒频移分辨已十分困难,增加了动目标检测的难度<sup>[12]</sup>。并且多普勒分辨率受积累脉冲数的限制,难以实现高分辨。当目标作非匀速运动时,雷达回波中调制有与目标机动特性相关的高阶多项式相位因子,这时的雷达回波信号将不满足传统信号处理中平稳性要求,导致基于傅里叶变换的传统MTD方法不再有效,多普勒徙动导致相参积累增益下降<sup>[13]</sup>。

### 2.2 基于时频分析的动目标检测方法

目标多普勒频率与目标速度近似成正比,当目

标做机动时，回波具有时变特性，例如，匀加速运动目标，回波为线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号，变加速目标回波可建模为二次调频(Quadratic Frequency Modulation, QFM)信号。运动状态比较复杂的目标在一段短的时间范围内，可用LFM信号作为其1阶近似<sup>[14]</sup>。对这些参数未知且背景复杂的FM信号的检测和参数估计有较大的意义。传统的傅里叶变换将信号在整体上分解为具有不同频率的正弦分量，仅能给出频率变化范围，不提供任何时间信息。时频分析方法是研究非平稳信号的有力工具，给出了特定时间和特定频率范围的能量分布，对LFM信号有良好的时频聚焦性，并可应用于杂波中的动目标检测。

作为线性时频表示，短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)最早被提出，是傅里叶变换的一种推广<sup>[15]</sup>。即将时间窗滑动作傅里叶变换，从而得到信号的时频分布(Time-Frequency Distribution, TFD)。但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。二次型时频分布中最典型的为Wigner-Vill分布(Wigner-Vill Distribution, WVD)，它直接利用信号的时频2维分布描述非平稳信号幅频特性随时间的变化情况，但WVD在多目标存在的情况下，交叉项将严重影响目标的检测。由于复杂环境中信号与杂波的谱相互混叠，经典的频域或空域处理对杂波中弱信号的检测难以奏效<sup>[16]</sup>。Wigner-Hough变换(Wigner-Hough Transform, WHT)是对WVD的时频平面进行Hough变换的直线积分投影，可有效地避免交叉项的干扰<sup>[17]</sup>，但信号积累后会出现虚假点，不利于信号的参数估计。小波变换(Wavelet Transform, WT)采用可调的时频窗，具有多分辨率的特点，在时频域都具有表征信号局部特征的能力<sup>[18]</sup>。然而，小波变换所需的小波基函数和分解层数没有相应的确定准则，并且分解的细节系数中包含部分目标信号，因此容易造成SCR损失。

以傅里叶变换为核心的傅里叶分析理论体系在分析与处理平稳信号时具有极大的优越性，然而在雷达高速高机动目标探测、低慢小目标以及多目标的探测与识别中，信号呈现出时变、非平稳等复杂特性，傅里叶分析理论体系在采样、滤波、分析上都遇到了新的挑战。作为傅里叶变换的广义形式，分数阶傅里叶变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)以LFM作为基函数，介于时域和频域之间的任意分数域表征(图1)，能够反映多普勒的变化规律，非常适于处理时变的非平稳信号，且无交叉项的干扰，从而引发了分数域信号处理理论的研究热潮。北京理工大学陶然教授团队<sup>[19-24]</sup>和张乃通院士团队<sup>[25-27]</sup>在分数域数字滤波与参数估计、采样与快速算法、多域分析与利用等方面进行了系统而深入的研究，取得了多项标志性成果。针对海上动目标回波难以有效积累、回波SCR低等难题，海军航空工程学院海上目标探测课题组研究了分数域海杂波抑制与动目标检测方法(原理框图如图2所示)，采用FRFT谱<sup>[12]</sup>以及短时FRFT(Short-Time FRFT, STFRFT)<sup>[28]</sup>对目标信号匹配增强，实现时变非平稳信号的时频谱高分辨表示。

基于时频变换的雷达动目标检测方法实质是时间和多普勒维对传统MTD方法的扩展，很多方法已用于实际雷达装备中，但问题在于该类方法多为参数搜索类方法，如FRFT的变换角搜索，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，若目标运动特性与变

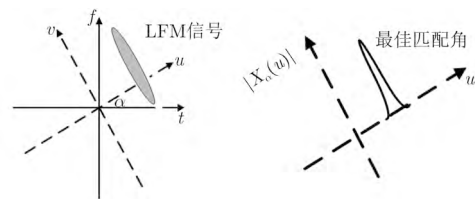


图1 FRFT对LFM信号检测原理框图  
Fig. 1 Diagram of LFM signal detection via FRFT

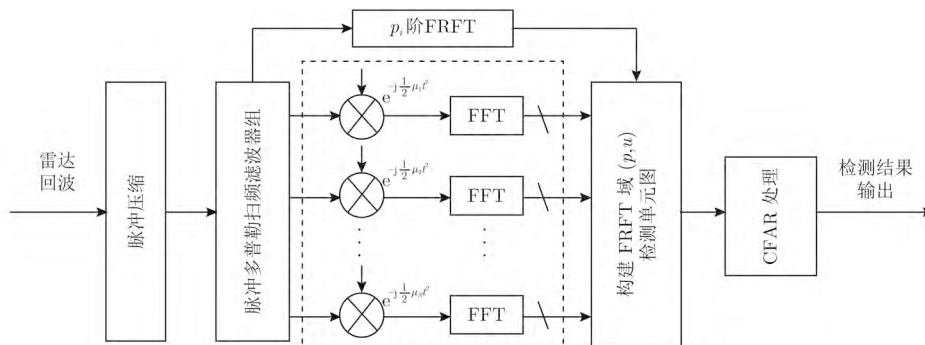


图2 FRFT域动目标检测原理框图<sup>[6]</sup>  
Fig. 2 Flowchart of moving target detection in FRFT domain<sup>[6]</sup>

换方法不相匹配,难以达到显著提升SCR的效果。因此,仍需研究高效、鲁棒性强、适用多种复杂背景和目标的分析方法。

### 2.3 基于长时间积累的高速高机动目标检测方法

具有低可观测性的运动目标在距离和多普勒分辨单元中往往具有较低的SNR/SCR,降低了雷达的检测性能<sup>[29]</sup>。在雷达信号处理中,通常可以延长积累时间以增加目标的能量,达到改善信号SNR/SCR的目的<sup>[30]</sup>。然而,对于常规机械扫描雷达,波束在每个指向的驻留时间有限,因此积累脉冲数有限。数字相控阵雷达和多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)雷达增加了波束的驻留时间,为目标的长时间积累提供了可能性。值得注意的是,在实际应用中,积累时间的长短是一个相对的概念,取决于雷达观测模式、波束驻留时间、重复频率和采样频率等多种因素。针对目标的不同运动类型,积累时间也是不同的。

根据长时间脉冲积累是否利用目标信号的相位信息,可分为非相参和相参积累两种。常用的非相参积累方法包括包络插值移位补偿法、动态规划法、最大似然法和Hough变换(HT)法<sup>[31]</sup>等,但其SNR/SCR改善不明显,不适于复杂环境中动目标检测。相参积累技术利用目标的运动特性和多普勒信息,可获得更高的积累增益。目前长时间相参积累主要面临以下两个方面的问题:一方面,由于雷达距离分辨力的不断提高和目标的高速运动,目标回波包络在不同脉冲周期之间走动和弯曲,称为距离徙动效应(Across Range Unit, ARU)<sup>[32]</sup>,使得目标能量在距离向分散,传统基于单一距离单元的MTD方法积累效果差;另一方面,目标的加速、高阶运动以及转动等会引起回波相位变化,使雷达回波信号具有时变特性并表现为高阶相位形式,产生多普勒徙动(Doppler Frequency Migration,

DFM)<sup>[33]</sup>,目标能量在频域分散,降低了相参积累增益,例如火箭和导弹在飞行过程中的推力变化导致加加速度(急动度),低空掠海飞行目标、快艇、以及高海况下的海面起伏目标等,回波具有2次以上的高阶相位。

图3为X波段CSIR雷达实测数据<sup>[34]</sup>(TFC17-006)分析,其中图3(a)的距离-时间图表明雷达观测时间为100 s,观测范围约45个距离单元,仅通过幅度难以从强海杂波中发现目标。图3(b)为目标距离走动、GPS轨迹和多项式拟合曲线示意图,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(图3(c)),可以看出目标多普勒随时间变化,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和多普勒维均发散,需要进行补偿提高相参积累增益。

目前,如何有效地同步完成距离和多普勒徙动的补偿成为长时间相参积累的关键问题。北京理工大学许稼教授提出的空时频检测前聚焦(Focus-Before-Detects, FBD)雷达信号处理方法为长时间相参积累技术理论发展和应用提供了新的研究思路,提出的Radon-傅里叶变换<sup>[5,35-37]</sup>(Radon-FT, RFT)和广义RFT (Generalized RFT, GRFT)<sup>[38]</sup>方法通过联合搜索参数空间中目标参数的方式解决了距离徙动与相位调制耦合的问题,可实现运动目标“三跨”(跨距离、多普勒和波束)情形下有效的相参积累。目前该领域主要有如下几个研究方向(如图4所示):一是利用目标运动特征的变换域信号匹配增强方法,主要利用目标的加速度、急动度以及高阶运动特征设计相应的变换域匹配增强方法,例如Radon-FRFT (Radon-FRFT, RFRFT)<sup>[13]</sup>、Radon-线性正则变换(Radon-Linear Canonical Transform, RLCT)<sup>[35]</sup>、Radon-分数阶模糊函数(Radon-Fractional

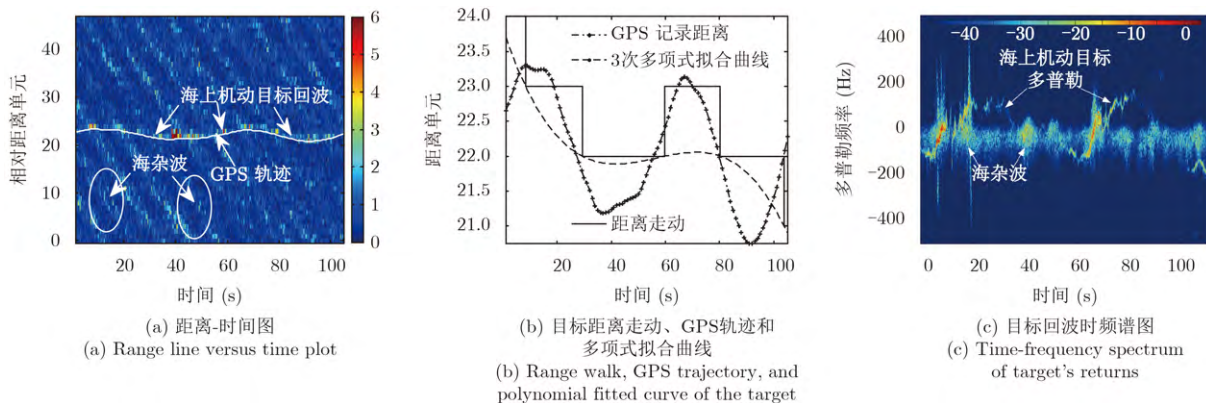


图 3 海上机动目标的距离和多普勒徙动(X波段CSIR雷达数据)

Fig. 3 Range and Doppler migrations of marine maneuvering target (X-band CISR data)

Ambiguity Function, RFRAF)<sup>[39]</sup>和Radon-线性正则模糊函数(Radon-Linear Canonical Ambiguity Function, RLCAF)<sup>[40]</sup>等方法,用于空中高速高机动目标以及海上微动目标的检测(图5给出了S波段雷达数据处理结果);二是分步徙动校正法,即采

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<sup>[36]</sup>,但该类方法的问题在于后续多普勒徙动补偿的效果受距离徙动补偿结果影响;三是无变换参数搜索法<sup>[37,41]</sup>,该类方法可直接将目标的运动特征体现在设计的变换域中,提高参数估计精度。

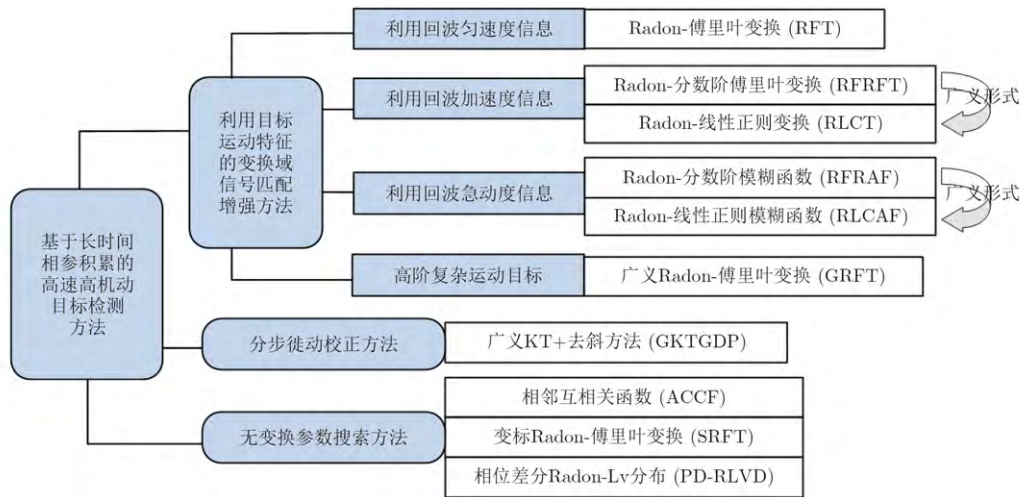


图4 基于长时间相参积累的高速高机动目标检测方法

Fig. 4 High-speed and maneuvering target detection based on long-time coherent integration

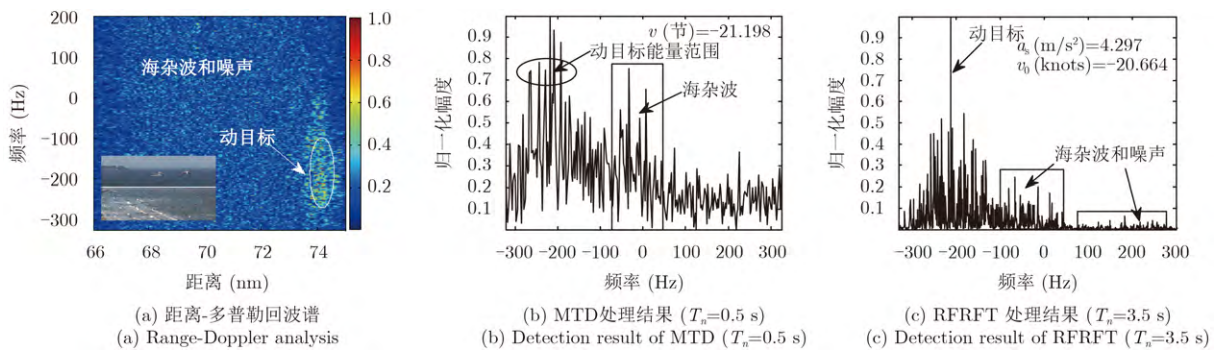


图5 利用目标加速度信息的长时间相参积累检测方法(S波段雷达数据)<sup>[13]</sup>

Fig. 5 Long-time coherent integration-based detection method using acceleration of target (S-band radar data)<sup>[13]</sup>

时频分析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,主要体现在:(1)积累和检测方法通用性差,处理过程复杂,参数和影响因素多;(2)需要大量的回波脉冲作积累,多适用于凝视或重点观测模式,受目标运动以及雷达资源的限制,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,亟待发展和研究高时频分辨率、大数据量高效、自适应以及适用于多分量信号分析的方法和手段。

### 3 高分辨稀疏域杂波抑制及动目标检测技术

#### 3.1 稀疏表示技术概述

压缩感知(Compressive Sensing, CS)是一种新的信号获取与压缩重构方法<sup>[7]</sup>,突破采样定理的限制,对噪声不敏感,并且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<sup>[8,9]</sup>。信号时频处理方法作为时变特征分析工具具有不可比拟的优势,但估计性能受时频分辨率的限制。基于时频分析的参数估计方法可以看作将信号在时频基函数上的分解,如果信号的特性与分解的基函数相匹配,就可以采用某几个基函数的组合来表示原始信号,

即信号稀疏表示<sup>[42]</sup>。时频分析方法是将在一组完备的时频基上展开,如果将能够很好地刻画信号局部时频结构的时频原子构成的过完备字典替代完备基函数,使信号的自适应表示成为可能,则参数估计问题转化为信号的稀疏表示问题。目标雷达回波可视为少数强散射中心回波的叠加,回波具有稀疏特性,因此,采用稀疏表示的方法分析微动信号,并进行参数估计是非常适合的。

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<sup>[8]</sup>。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)在多分量信号的情况下,通过信号的稀疏分解能够实现信号分离,从而转化为单分量信号处理,故不受信号之间交叉项的影响<sup>[43,44]</sup>;(2)在目标稀疏域抑制杂波或噪声,改善SNR/SCR,因此有利于微弱信号的检测和估计<sup>[42]</sup>;(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,从而更有利于获得精细的运动特征<sup>[45]</sup>;(4)结合传统快速时频分析方法,能够降低运算量,提高运算效率,如稀疏快速傅里叶变换(Sparse Fast Fourier Transform, SFFT)<sup>[46]</sup>。

### 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已经利用了杂波在这些域中的稀疏性,但是这方面研究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。杂波回波在距离门之间和多普勒门之间存在相关性,因此隐含着固有的、稀疏的信息,可以在某种空间基下或者某个字典下稀疏表示,即可以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<sup>[45,47]</sup>。

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和检测方面的重要性,在美国、欧洲等许多国家的知名大学如加利福尼亚理工学院、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<sup>[48,49]</sup>,"CS理论在雷达、声呐和遥感中的应用(CoSeRa)"系列国际会议(IEEE信号处理SP分会、航空AESS分会和IET承办)已经举办了四届,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、中科院电子所、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<sup>[47-53]</sup>。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,一方面是将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,其他部分被认为是噪声,在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,从而把纯净信号从含噪信号中分离出来。朱厦等人<sup>[52]</sup>提出一种基于信号稀疏表示的Chirp信号参数估计方法,将单自由度多分量LFM信号的参数估计问题转化为信号的稀疏表示问题。余付平等人<sup>[53]</sup>提出利用稀疏分解方法和基追踪去噪算法实现抗噪声。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<sup>[45]</sup>。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等。

### 3.3 稀疏域微动目标检测及特征提取

在实际中,目标的运动状态复杂多样,尤其是海上低可观测目标。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,还绕参考点作三轴转动,导致回波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的处理,提取信号的精细特征。近年来,微多普勒(Micro-Doppler, M-D)理论为非平稳信号的分析 and 处理提供了新的思路<sup>[54]</sup>,研究表明,微多普勒适合分析海上目标回波信号,不仅拓展了信号维度,还能提取更多有用信息,从而进一步提升雷达检测能力<sup>[3]</sup>。图6给出了典型海上目标的微动特性(皮划艇、快艇及海鸥)。微多普勒理论“创始人”Victor C. Chen教授<sup>[55]</sup>在《Radar Micro-Doppler Signature: Processing and Applications》中将海面目标的复杂运动作为微动特性分析的重要研究内容,值得深入研究。2015年,《IET Radar, Sonar & Navigation》出版了微多普勒的专刊,重点提到“海杂波剧烈变化,海面目标受海况的影响也具有微动特性”<sup>[41]</sup>。信号时频处理方法作为微动特征分析工具具有一定的优势,但估计性能受时频分辨率的限制。目标雷达回波可视为少数强散射中心回波的叠加,回波具有稀疏特性,因此,采用稀疏表示的方法分析微动信号,并进行参数估计是非常适合的<sup>[56]</sup>。

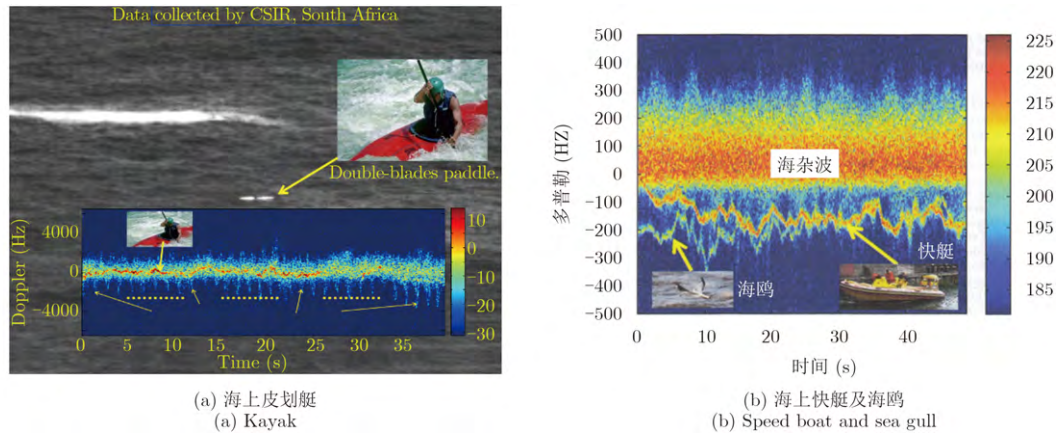


图6 典型海上微动目标回波特性  
Fig. 6 Properties of some typical marine targets with micromotion

目前，已开始有少数国内外学者将信号稀疏表示理论用于目标微动特征分析及提取方面<sup>[57-59]</sup>，作为一种新兴的信号处理方法，其在微动信号处理方面又具有很大的优势，表现在频率超分辨，无交叉项，抗噪性好等，从而更有利于获得目标精细特征。由于微动信号在一段观测时间内可建模为LFM或周期调频信号，因此，国内外学者从典型微动信号的稀疏分解方法入手，研究微多普勒的提取和分析方法。西安电子科技大学朱圣棋等人<sup>[57]</sup>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。文献[58]研究表明，利用CS理论从回波信号中提取的弹道导弹的微多普勒，与理论计算得到结果是一致的。罗迎等人<sup>[59]</sup>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。上述思路和方法对于稀疏域微多普勒信号分析具有示范作用，在算法计算时间以及参数估计精度方面均优于传统的时频分析方法。但微动目标回波信号较为复杂，不仅包含时变的目标微多普勒信号，还有背景杂波，在时域和频域均有所

交叠。若采用单一字典进行稀疏分解(稀疏成分分析(Sparse Component Analysis, SCA)<sup>[60]</sup>)，往往达不到稀疏表示微动信号的效果，导致性能下降，稀疏域海杂波和微动信号难以区分。形态成分分析(MCA)方法<sup>[42]</sup>则利用了信号组成成分的形态差异性，采用不同的字典进行稀疏表示，与传统SCA方法相比更适合分析混合信号。由于海杂波和微动目标雷达回波信号形式及特性有所不同，采用MCA分析方法能够更好地区分海杂波和微动目标，有助于提高海杂波背景下的目标检测性能，如图7所示。

3.4 雷达动目标高分辨稀疏时频分析技术

受目标运动以及雷达资源的限制，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提取目标的特征并用于检测成为亟需研究的问题。利用动目标回波信号具有稀疏性的特点，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 TFD, STFD)<sup>[61-64]</sup>的方法对目标特性进行研究，能够有效提高算法运算效率、时频分辨率和参数估计性能。目前，国外对该技术的研究尚处于起步阶段，典型的方法包括稀疏傅里叶变换(Sparse FT, SFT)<sup>[65]</sup>和稀疏FRFT

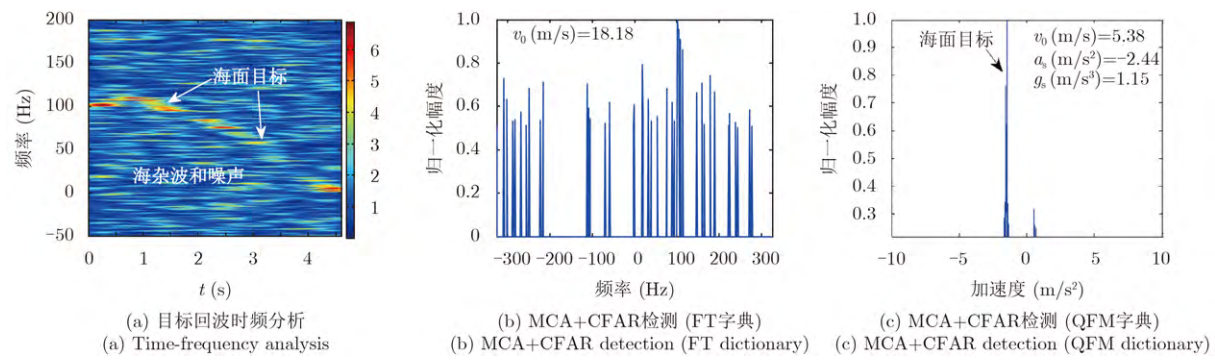


图7 基于MCA海上微动目标检测和特征提取处理结果(S波段雷达数据,  $P_{fa}=10^{-4}$ )<sup>[42]</sup>

Fig. 7 Detection and signature extraction of marine micromotion target via MCA (S-band radar data,  $P_{fa}=10^{-4}$ )<sup>[42]</sup>

(Sparse FRFT, SFRFT)<sup>[21]</sup>等, 美国麻省理工学院(MIT)成立了专门的实验室对SFT进行研究, 图8为其开发的SFFT3.0与FFT算法的运算量对比结果, 可以看出相比经典FFT, SFFT能够极大降低运算量, 提高运算效率, 因此, 非常适合雷达信号的实时处理。此外, 一些学者已将稀疏时频分析技术应用于非平稳信号的特性分析和参数估计, 文献[66]表明非平稳时变信号在时频域具有更好的稀疏性; N. Whiteloni等人<sup>[67]</sup>提出了一种基于WVD和CS的联合时频分布方法对雷达信号进行分析, 在保证时频分辨率的同时有效减少了交叉项。文献[68]通过稀疏时频分析提高了信号瞬时频率的估计精度。图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

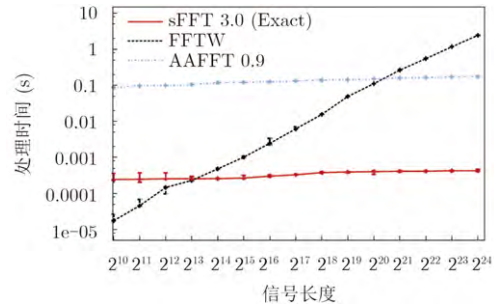


图 8 FFT与SFT的运算量对比分析(美国MIT实验室)

Fig. 8 Comparison of computation cost between FFT and SFT (MIT Laboratory)

时频分析技术不仅能够获得高分辨的信号谱特征, 还能很好地抑制背景噪声和杂波, 改善SCR, 因此可用于雷达低可观测动目标检测。

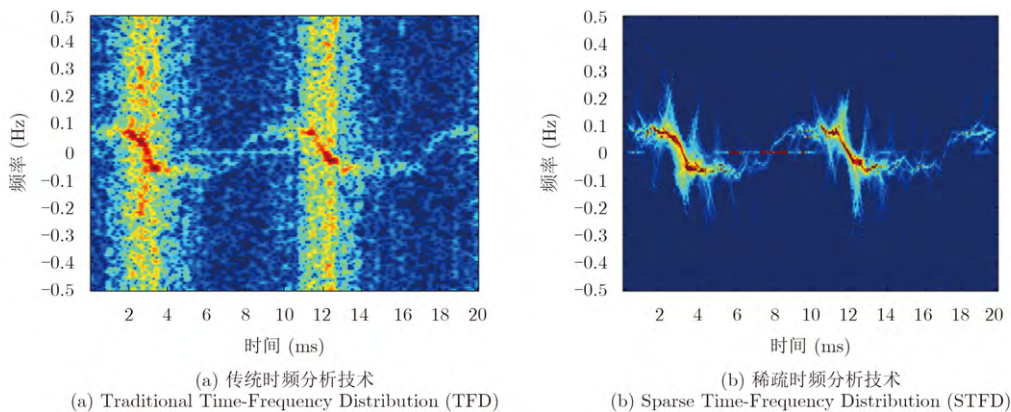


图 9 传统时频分析和稀疏时频分析技术的人体运动目标回波分析结果对比

Fig. 9 Comparison of human movement analysis between traditional TFD and STFD

由上述分析可知, STFD方法能够突破采样定理的限制, 具有运算效率高、分辨率好等优点, 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, 利用高分辨率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, 进而提升雷达动目标的探测性能。

#### 4 实测雷达数据分析和验证

采用南非CSIR对海雷达数据初步验证基于高分辨稀疏表示的雷达动目标检测技术, 试验所采用的Fynmeet雷达为相参体制, 工作频率为9 GHz, 参试合作目标为安装有GPS的WaveRider RIB快艇, 数据编号为TFC17\_006, 海况等级为4级, 雷达回波及特性如图3所示。基于高分辨稀疏表示的检测结果如图10所示, 选取数据时间起始为75 s,

虚警概率设为 $10^{-4}$ , 比较了稀疏傅里叶变换(SFT)、稀疏FRFT (SFRFT)以及稀疏FRAF (SFRAF) 3种方法。可以看出, 动目标回波信号在不同的稀疏域有不同分布的能量聚集, 其实质在于匹配动目标信号的字典不同, 由于该段时间内, 动目标回波可由QFM近似, SFRAF性能由于SFRFT和SFT, 由于海杂波在该稀疏域不能很好地被稀疏表示, 杂波虚警较少, 提高了雷达的检测概率。进一步定量分析和比较常规方法与稀疏表示类方法的检测性能和计算时间, 如表1所示。可知, 在SCR较低的情况下, 在目标稀疏域设计的检测方法性能最优(SFRAF), 同时利用SFFT类快速算法, 可极大提高运算效率。

#### 5 结束语

高分辨稀疏表示分析方法突破采样定理的限制, 具有时频分辨率高、抗杂波以及适合多分量信号分析等优点, 为雷达杂波抑制和动目标检测提供

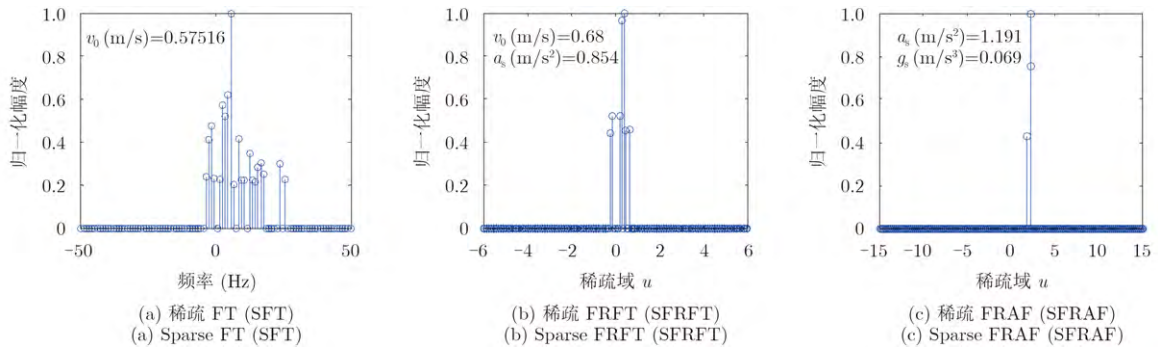


图 10 基于STFD的海上动目标检测结果对比(X波段CSIR雷达数据TFC17\_006, 切面图,  $P_{fa}=10^{-4}$ )

Fig. 10 Marine moving target detection comparisons via different STFDs (X-band CSIR datasets TFC17\_006, slice plot,  $P_{fa}=10^{-4}$ )

表 1 检测性能和计算时间对比(仿真机动目标+TFC17\_006海杂波, 采样点1024,  $P_{fa}=10^{-4}$ )

Tab. 1 Comparison of detection performance and computational burden (Simulated moving target+TFC17\_006 sea clutter, sampling number 1024,  $P_{fa}=10^{-4}$ )

检测方法	MTD	SFT	FRFT	SFRFT	FRAF	SFRAF
稀疏信号分量	—	13	—	10	—	2
$P_d$ (SCR= -5 dB)	62.47%	68.35%	68.74%	70.21%	85.69%	89.35%
计算时间* (ms)	4.69	5.73	12.54	8.92	14.61	10.52

“\*”: 计算机配置: Intel Core i7-4790 3.6 GHz CPU; 16 G RAM; Matlab R2014a, 计算时间为算法1次运算时间

了新的思路和方向。本文重点从应用角度进行归纳总结, 系统回顾了雷达动目标检测的常规方法, 然后对稀疏表示在雷达杂波特性和抑制、动目标检测和特征提取等方面的应用进行了初步总结、归纳和展望, 并提出了雷达动目标高分辨稀疏时频分析技术, 最后结合实测数据和已有成果给出了部分处理结果。目前, 该领域仍有很多问题亟待解决和研究, 例如:

(1) 杂波稀疏域判定及影响因素分析

寻找适合描述杂波的稀疏域是实现杂波稀疏表示和稀疏域抑制的第1步, 但是由于雷达配置方式的不同, 包括观测视角(掠射角)、波段和极化方式, 以及复杂环境下的海杂波非平稳和非线性特性, 使得不同观测条件下的海杂波稀疏性不尽相同, 稀疏域和稀疏分析方法也不同, 必须考虑诸多非理想因素对稀疏域的选择及稀疏程度的影响。

(2) 雷达回波自适应稀疏表示

对于可能包含多种特征的观测数据, 特别是对于非理想因素条件下获取的观测数据, 有必要采取学习和训练的方式来自适应地构造基于观测数据的过完备字典, 相应地, 为应对明显增加的运算复杂度, 必须研究具有低复杂度的自适应稀疏分解算法。

(3) 多分量混合信号稀疏域特征提取

雷达动目标回波信号较为复杂, 动目标和杂波在时域和频域均有所交叠。此外, 动目标的多种复杂运动形式(如平动和转动)之间存在耦合, 产生多

分量信号, 稀疏域杂波和动目标信号难以区分。因此, 一方面需研究适合多分量信号的稀疏分析方法; 另一方面寻找提高特征提取和估计精度的有效方法。

(4) 稀疏认知学习与目标识别

智能信息处理是当前信息科学理论和应用研究中的一个热点领域。稀疏表示最初的思想却来源于生物视觉认知领域, 借鉴生物视觉的稀疏认知机理, 学习并完成该机理的数学建模, 进而通过得到的稀疏认知计算模型实现目标的识别<sup>[69]</sup>, 相关的理论方法有稀疏贝叶斯学习理论、稀疏主成分分析等。

此外, 随着新体制雷达的快速发展, 不同体制的稀疏域雷达信号处理方法也需要进一步研究和设计, 目标的复杂运动特性也给信号稀疏表示带来了极大挑战。可以预期, 高分辨稀疏表示技术的成熟和发展将弥补已有动目标检测方法的不足, 能够进一步提升雷达动目标的探测和识别能力。

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.  
 Yang Jian-yu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 19-27.  
 [2] 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.  
 He You, Huang Yong, Guan Jian, et al. An overview on radar target detection in sea clutter[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(12): 1-9.

- [3] 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.  
Chen Xiao-long, Guan Jian, and He You. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(1): 123–134.
- [4] Zuo Lei, Li Ming, Zhang Xiao-wei, *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.
- [5] 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.  
Xu Jia, Peng Ying-ning, Xia Xiang-gen, *et al.* Radar signal processing method of space-time-frequency focus-before-detects[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(2): 129–141.
- [6] 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.  
Chen Xiao-long, Guan Jian, Huang Yong, *et al.* Application of fractional Fourier transform in moving target detection and recognition: Development and prospect[J]. *Journal of Signal Processing*, 2013, 29(1): 85–97.
- [7] Donoho David L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [8] 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.  
Li Gang and Xia Xiang-gen. Parametric sparse representation and its applications to radar sensing[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(1): 1–7.
- [9] 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.  
Jiao Licheng, Yang Shuyuan, Liu Fang, *et al.* Development and prospect of compressive sensing[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1651–1662.
- [10] 宋杰, 何友, 关键. 一种双模杂波抑制的自适应MTI系统[J]. 兵工学报, 2009, 30(5): 546–550.  
Song Jie, He You, and Guan Jian. A near adaptive MTI system for bimodal clutter suppression[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(5): 546–550.
- [11] 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.  
Ma Xiao-yan and Yuan Jun-quan. Simulation analysis for MTD detectability improvement using the discrete wavelet transform (DWT)[J]. *Journal of Signal Processing*, 2001, 17(2): 148–151.
- [12] Guan Jian, Chen Xiao-long, *et al.* Adaptive fractional Fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2012, 6(5): 389–401.
- [13] Chen Xiao-long, Guan Jian, Liu Ning-bo, *et al.* Maneuvering target detection via Radon-fractional Fourier transform-based long-time coherent integration[J]. *IEEE Transaction on Signal Processing*, 2014, 62(4): 939–953.
- [14] 庞存锁. 基于离散多项式相位变换和分数阶傅里叶变换的加速目标检测算法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 184–188.  
Pang Cun-suo. An accelerating target detection algorithm based on DPT and fractional Fourier transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 184–188.
- [15] Yonina C Eldar, Pavel Sidorenko, Dustin G Mixon, *et al.* Sparse phase retrieval from short-time Fourier measurements[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(5): 638–642.
- [16] Saad Qazi, Apostolos Georgakis, Lampros K Stergioulas, *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.
- [17] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner-Hough transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(6): 1511–1515.
- [18] Jérôme Gilles. Empirical wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(16): 3999–4010.
- [19] 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.  
Tao Ran, Deng Bing, and Wang Yue. Fractional Fourier Transform and Its Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [20] Feng Qiang and Li Bing-zhao. Convolution and correlation theorems for the two-dimensional linear canonical transform and its applications[J]. *IET Signal Processing*, 2016, 10(2): 125–132.
- [21] Liu Sheng-heng, Shan Tao, Tao Ran, *et al.* Sparse discrete fractional Fourier transform and its applications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(24): 6582–6595.
- [22] Tao Ran, Li Xue-mei, Li Yan-lei, *et al.* Time-delay estimation of chirp signals in the fractional Fourier domain[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(7): 2852–2855.
- [23] Tao Ran, Zhang Feng, and Wang Yue. Fractional power spectrum[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(9): 4199–4206.
- [24] Tao Ran, Li Yan-lei, and Wang Yue. Short-time fractional Fourier transform and its applications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(5): 2568–2580.
- [25] 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.  
Sha Xue-jun, Shi Jun, Zhang Qin-yu, *et al.* Fractional Fourier Transform Theory and Its Applications in

- Communication Systems[M]. *Beijing: Post & Telecom Press*, 2013.
- [26] Liu Xiao-ping, Shi Jun, Xiang Wei, *et al.* Sampling expansion for irregularly sampled signals in fractional Fourier transform domain[J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 34: 74–81.
- [27] Shi Jun, Xiang Wei, Liu Xiaoping, *et al.* A sampling theorem for the fractional Fourier transform without band-limiting constraints[J]. *Signal Processing*, 2014, 98: 158–165.
- [28] Chen Xiao-long, Guan Jian, Bao Zhong-hua, *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.
- [29] Xing Meng-dao, Su Jun-hai, Wang Gen-yuan, *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.
- [30] 吴孙勇, 廖桂生, 朱圣棋, 等. 提高雷达机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.  
Wu Sun-yong, Liao Gui-sheng, Zhu Sheng-qi, *et al.* A new method for radar maneuvering target detection based on matched filtering in two-dimensional frequency domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(12): 2415–2420.
- [31] Carlson B D, Evans E D, and Wilson S L. Search radar detection and track with the Hough transform. I. system concept[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(1): 102–108.
- [32] Yu Ji, Xu Jia, Peng Ying-ning, *et al.* Radon-Fourier transform for radar target detection (III): Optimality and fast implementations[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 991–1004.
- [33] Tao Ran, Zhang Nan, and Wang Yue. Analysing and compensating the effects of range and Doppler frequency migrations in linear frequency modulation pulse compression radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(1): 12–22.
- [34] De Wind H J, Cilliers J E, and Herselman P L. Dataware: Sea clutter and small boat radar reflectivity databases[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2010, 27(2): 145–148.
- [35] Chen Xiao-long, Guan Jian, Liu Ning-bo, *et 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.
- [36] Kong Ling-jiang, Li Xiao-long, Cui Guo-long, *et al.* Coherent integration algorithm for a maneuvering target with high-order range migration[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2015, 63(17): 4474–4486.
- [37] Li Xiao-long, Cui Guo-long, Yi Wei, *et al.* A fast maneuvering target motion parameters estimation algorithm based on ACCF[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(3): 265–269.
- [38] Xu Jia, Xia Xiang-gen, Peng Shi-bao, *et al.* Radar maneuvering target motion estimation based on generalized Radon-Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(12): 6190–6201.
- [39] Chen Xiao-long, Huang Yong, Liu Ning-bo, *et al.* Radon-fractional ambiguity function-based detection method of low-observable maneuvering target[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(2): 815–833.
- [40] Chen Xiao-long, Guan Jian, Huang Yong, *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.
- [41] Chen Xiao-long, Guan Jian, Li Xiu-you, *et al.* Effective coherent integration method for marine target with micromotion via phase differentiation and Radon-Lv's distribution[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation (Special Issue: Micro-Doppler)*, 2015, 9(9): 1284–1295.
- [42] 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.  
Chen Xiao-long, Guan Jian, Dong Yun-long, *et al.* Sea clutter suppression and micromotion target detection in sparse domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(4): 860–867.
- [43] Faruk Uysal, Ivan Selesnick, Unnikrishna Pillai, *et al.* Dynamic clutter mitigation using sparse optimization[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2014, 29(7): 37–49.
- [44] Xu Jin, Wang Wei, Gao Jing-huai, *et al.* Monochromatic noise removal via sparsity-enabled signal decomposition method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 533–537.
- [45] 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.  
Luo Qian. Small moving target detection using sparse clutter modeling[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(2): 43–46.
- [46] Gilbert A, Guha S, Indyk P, *et al.* Near-optimal sparse Fourier representations via sampling[C]. *Proceedings of the 34th ACM Symposium on Theory of Computing*, New York, 2002: 152–161.
- [47] Yang Zhao-cheng, Li Xiang, Wang Hong-qiang, *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.
- [48] Laura Anitori, Arian Maleki, Matern Otten, *et al.* Design and analysis of compressed sensing radar detectors[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(4): 813–827.

- [49] Marco F Duarte and Yonina C Eldar. Structured compressed sensing: From theory to applications[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(9): 4053–4085.
- [50] Yang Jun-gang, Thompson John, Huang Xiao-tao, *et al.* Random-frequency SAR imaging based on compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(2): 983–994.
- [51] 方明, 戴奉周, 刘宏伟, 等. 基于联合稀疏恢复的宽带雷达目标检测方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(12): 2977–2983.  
Fang Ming, Dai Feng-zhou, Liu Hong-wei, *et al.* Detection of moving targets for wideband radar based on joint-sparse recovery[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(12): 2977–2983.
- [52] 朱厦, 李彦鹏, 黎湘, 等. 基于信号稀疏表示的Chirp信号参数估计方法[J]. 现代雷达, 2008, 30(4): 59–63.  
Zhu Xia, Li Yan-peng, Li Xiang, *et al.* A new method for parameter estimation of chirp signal based on sparse signal representation[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(4): 59–63.
- [53] 余付平, 冯有前, 高大化, 等. 基于稀疏分解的雷达信号抗噪声干扰方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1765–1769.  
Yu Fu-ping, Feng You-qian, Gao Da-hua, *et al.* Research on anti-noise jamming of radar signals based on sparse decomposition[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(8): 1765–1769.
- [54] Victor C Chen, Fayin Li, Shen-Shyang Ho, *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.
- [55] Victor C Chen, David Tahmoush, and William J Miceli. Radar Micro-Doppler Signature: Processing and Applications[M]. UK: IET, 2014.
- [56] Li Gang and Pramod K Varshney. Micro-Doppler parameter estimation via parametric sparse representation and pruned orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(12): 1939–1404.
- [57] 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.
- [58] 贺思三, 赵会宁, 张永顺. 基于延迟共轭相乘的弹道目标平动补偿[J]. 雷达学报, 2014, 3(5): 505–510.  
He Si-san, Zhao Hui-ning, and Zhang Yong-shun. Translational motion compensation for ballistic targets based on delayed conjugated multiplication[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 505–510.
- [59] 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.  
Luo Ying, Zhang Qun, Wang Guo-zheng, *et al.* Micro-motion signature extraction method for wideband radar based on complex image OMP decomposition[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(4): 361–369.
- [60] Hadi Zayyani and Babaie-Zadeh M. Approximated Cramér-Rao bound for estimating the mixing matrix in the two-sensor noisy Sparse Component Analysis (SCA)[J]. *Digital Signal Processing*, 2013, 23: 771–779.
- [61] Ali Gholami. Sparse time-frequency decomposition and some applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3598–3604.
- [62] Patrick Flandrin and Pierre Borgnat. Time-frequency energy distributions meet compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(6): 2974–2982.
- [63] 陈沛, 赵拥军, 刘成城. 基于稀疏时频分解的盲波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3078–3084.  
Chen Pei, Zhao Yong-jun, and Liu Cheng-cheng. Blind beamforming algorithm based on sparse time-frequency decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3078–3084.
- [64] 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, 已录用.  
Chen Xiao-long, Guan Jian, Yu Xiao-han, *et al.* Radar micro-Doppler signature extraction and detection via short-time sparse time-frequency distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, Accepted.
- [65] 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 Processing Magazine*, 2014, 31(5): 91–100.
- [66] Gotz E Pfander and Holger Rauhut. Sparsity in time-frequency representations[J]. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 2010, 16(2): 233–260.
- [67] Nicholas Whiteloni and Hao 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: 1–2.
- [68] Branka Jokanovic, Moeness Amin, and Srdjan Stankovic. Instantaneous frequency and time-frequency signature estimation using compressive sensing[C]. Proceedings of the SPIE 8714, Radar Sensor Technology XVII 871418, 2013. DOI: 10.1117/12.2016636.
- [69] 焦李成, 赵进, 杨淑媛, 等. 稀疏认知学习、计算与识别的研究进展[J]. 计算机学报, 2016, 39(4): 835–851.  
Jiao Li-cheng, Zhao Jin, Yang Shu-yuan, *et al.* Research advances on sparse cognitive learning, computing and recognition[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(4): 835–851.

### 作者简介



陈小龙(1985-), 男, 山东烟台人, 博士, 海军航空工程学院电子信息工程系讲师。承担国家自然科学基金等项目7项, 发表学术论文50余篇, 授权国家发明专利13项。获中国电子学会优秀博士学位论文奖、入选中国科协“青年人才托举工程”。

研究方向为雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达信号精细化处理等。

E-mail: cxcxl1209@163.com



关键(1968-), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士生导师, 海军航空工程学院电子信息工程系主任。承担973、国家自然科学基金、国防预研等项目20余项。发表论文140余篇, 出版学术专著2部, 获国家发明专利22项。获全国优秀博士学位论文奖, 获得国家科技进步二等奖1项、军队科技进步一等奖2项, 山东省技术发明一等奖1项; “百千万人才工程”国家级人选, 入选教育部新世纪优秀人才支持计划, “泰山学者”特聘教授。主要研究方向为雷达目标检测与跟踪、侦察图像处理和信息融合。

研究方向为雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达视频跟踪等。

E-mail: guanjian96@tsinghua.org.com



何友(1956-), 男, 吉林磐石人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 海军航空工程学院信息融合研究所所长。主要研究领域有雷达目标检测方法、多传感器信息融合、多目标跟踪、分布检测理论及应用、军事大数据等。



于晓涵(1991-), 女, 河北沧州人, 博士生, 海军航空工程学院信息融合研究所。研究方向为雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达视频跟踪等。

E-mail: 2953164562@qq.com