

# 雷达低可观测动目标精细化处理及应用

陈小龙<sup>1</sup>, 关键<sup>1</sup>, 黄勇<sup>1</sup>, 于晓涵<sup>2</sup>, 刘宁波<sup>2</sup>, 董云龙<sup>2</sup>, 何友<sup>2</sup>

1. 海军航空大学电子信息工程系, 烟台 264001

2. 海军航空大学信息融合研究所, 烟台 264001

**摘要** 雷达探测环境复杂、探测对象特征多样, 回波具有低可观测性, 雷达探测性能难以满足实际需求, 面临着复杂环境下微弱目标检测难题。本文论述了低可观测动目标的内涵、特征、雷达探测面临的挑战以及精细化处理的关键技术, 结合雷达实测数据给出了工程应用的途径, 并展望了对精细化处理的发展方向。

**关键词** 雷达动目标检测; 低可观测目标; 精细化处理; 特征提取; 稀疏表示; 目标识别

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和国防安全领域应用广泛。雷达探测环境复杂、探测对象特征多样, 回波具有低可观测性, 雷达探测性能难以满足实际需求, 面临着复杂环境下微弱目标检测难题。近年来, 随着雷达体制和雷达信号处理技术的发展, 雷达具备获取精细化目标特征的能力, 通过扩展信号维度, 为雷达动目标探测和识别提供了新的途径。本文针对低可观测动目标雷达探测面临的挑战, 对精细化处理的关键技术进行总结和展望, 以期结合雷达实测数据为工程应用提供可选途径。

## 1 低可观测动目标探测面临的挑战

低可观测特性的目标种类很多, 其尺寸、形状及运动特性的不同导致目标具有不同的雷达散射特性和多普勒特性, 共同点是, 无论在时域还是在多普勒域, 目标回波信号信噪(杂)比(signal-to-noise/clutter ratio, SNR/SCR)都很低。目前雷达对低可观测探测过程中的技术难点主要体现在以下3个方面。

### 1.1 目标类型多, 特性复杂, 回波微弱

常说的“低慢小高快隐”目标也属于低可观测目标的范畴<sup>[1-5]</sup>。最为典型的包括以下两类目标。

一是, “低慢小”空中目标<sup>[6-7]</sup>, 是指具有低空(飞行高度一般在1 km以下)、慢速(速度 < 200 km/h), 小型航空器和空飘物(雷达反射截面积 < 2 m<sup>2</sup>), 该类涉及的范围比较广(包括如中小型飞机、直升机、滑翔机、三角翼、滑翔伞、动力伞、热气

球、飞艇、无人机、航空模型、孔明灯、空飘气球等通用航空器材及航空运动器材等)(图1)。



图1 典型的空中低可观测目标

Fig. 1 Classical aerial low-observable target

二是“低慢小”海上目标<sup>[8-9]</sup>, 例如渔船、游艇、蛙人、浮漂、潜望镜等小尺寸目标, 具有吸波涂层或外形的舰船、飞机等隐身目标, 浮漂、锚泊的小船等慢速目标, 航母等远距离目标等(图2)。

低可观测目标雷达回波微弱, 主要具有如下特性: 1) 目标尺寸较小, 因而回波很微弱; 2) 隐身目标, 这类目标的尺寸可能并不小, 但由于采用了隐身技术和措施, 同样导致回波微弱, 并且这类目标往往采取高速和超低空突防战术, 威胁很大; 3) 远距离目标或由于雷达距离分辨低、背景杂波强等导致的目标回波信杂比低; 4) 静止或慢速微弱目标, 这类目标的回波藏匿于强杂波或噪声背景中; 5) 快速机动目标, 在雷达观测时间内目标位置超过最小距离单元, 或由于机动导致的多普勒谱扩散, 回波难以积累。

收稿日期: 2017-09-25; 修回日期: 2017-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(61501487, 61401495, U1633122, 61471382, 61531020); 国防科技项目基金(2102024); 山东省高校科技发展计划项目(J17KB139); 航空科学基金项目(20162084005, 20162084006); 山东省“泰山学者”专项; 中国科协“青年人才托举工程”专项

作者简介: 陈小龙, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、海上目标探测等, 电子信箱: cxlxl1209@163.com

引用格式: 陈小龙, 关键, 黄勇, 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.002

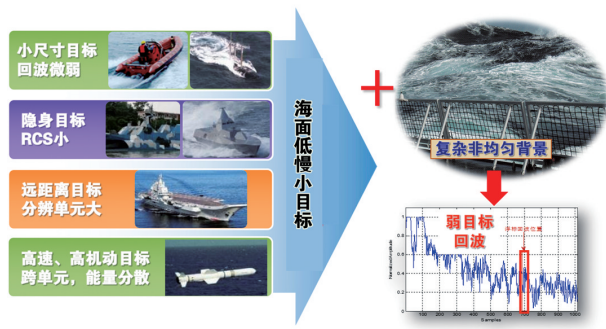


图2 典型的低可观测海上目标  
Fig. 2 Classical marine low-observable target

### 1.2 电磁环境复杂,杂波和干扰抑制难度大

雷达的探测环境不仅包括海、陆、空、天的四维空间,而且具有高密度、高强度、多频谱的复杂电磁环境<sup>[10]</sup>。电磁环境是电磁空间的一种表现形式,是存在于给定场所的所有电磁活动和现象的总和。电磁环境包括环境的无用回波(各类杂波,如海杂波、地杂波、气象杂波等)、自然电磁现象(闪电、电噪声等)、民用电磁现象(通信和广播电视信号)、敌对双方的电磁应用和反电磁应用活动(雷达电子干扰和抗干扰)等。实际雷达探测环境是上述电磁信号的总和,受各类自然电磁现象、人为电磁辐射、敌我双方电子对抗等因素的影响,呈现出信号密集、种类复杂、对抗激烈、动态变化等复杂特性。图3为不同天气条件下导航雷达P显画面,可以明显看出对复杂电磁环境的认知水平,直接影响到雷达对目标信号的检测、跟踪和识别性能<sup>[11-12]</sup>。

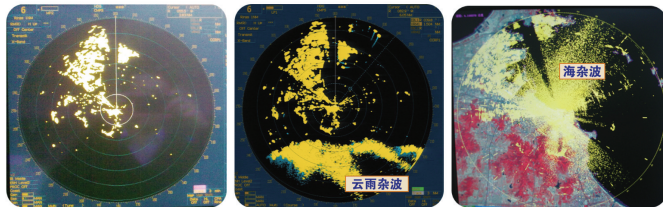


图3 不同天气条件下导航雷达P显画面  
Fig. 3 P displays of navigation radar under different weather conditions

### 1.3 目标运动复杂,建模和特征提取难

目标的微多普勒特征展示了时间、空间、频率三维特征空间的变化特性,扩展了信号维度,为检测、估计和识别提供更多有用信息,但其特征提取和估计技术仍有很多问题亟待解决和研究<sup>[13]</sup>。微多普勒特征提取关键在于瞬时频率的高精度估计。目前,微多普勒信号的特征提取和估计方法主要基于非平稳时变信号处理方法,典型的是时频分析法,但该类方法在时频分辨率、抗噪性、多分量信号分析等方面具有明显不足<sup>[14-15]</sup>。此外,目标的多维运动(俯仰、偏航、横滚、进动、章动、振动等)相互影响,各维变化都呈现出多倍周期和随机性的特点,使得目标姿态变化较为复杂,这些都为目标微动

特性感知增加了难度和挑战<sup>[3]</sup>。海上微动目标运动形式及微多普勒如图4所示。

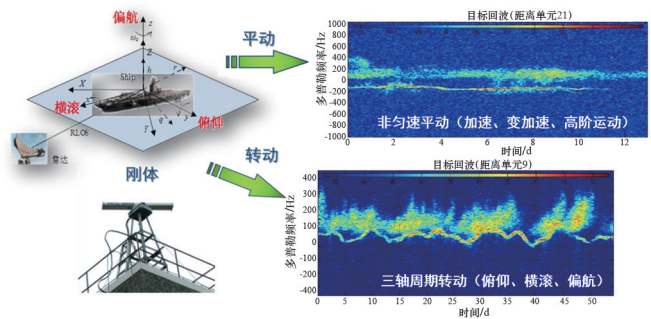


图4 海上微动目标运动形式及微多普勒谱  
Fig. 4 Micromotion of marine target and its micro-Doppler under different weather conditions

## 2 低可观测目标精细化处理技术

### 2.1 动目标信号时频变换域处理技术

目标多普勒频率与目标速度近似成正比,匀加速、变加速或高机动目标的回波均体现为对多普勒的调制,可由线性调频(linear frequency modulation, LFM)信号、二次调频信号(quadratic FM, QFM)或高阶相位信号来近似,其最重要的特点就是频率随时间的变化,因此,时频分析方法成为最常用的经典分析方法。从多分量信号变换后是否存在交叉项(变换是否为线性变换)将时频分析分为线性时频表示和非线性时频表示。前者最为典型的是短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)和小波变换(wavelet transform, WT)<sup>[16]</sup>等,多分量信号变换后不受交叉项的影响,但时频分辨率较低;非线性时频表示,主要是Cohen类时频分布,其中典型的是Wigner-Ville分布(WVD)、伪WVD(Pseudo WVD, PWVD)以及平滑伪SPWVD<sup>[17]</sup>等。目前,基于Cohen类方法分析微多普勒信号存在以下不足:1)由于时频分布的双线性特征,非线性频率调制信号或多元信号的时频分布中存在交叉项影响,谱图重排能够减小交叉项的影响,却以降低分辨率为代价,典型的如重排平滑伪WVD(reassigned SPWVD, RSPWVD);2)针对相位是无限可导的正弦调频信号(Sinusoidal FM, SFM)微动目标回波模型,采用WVD处理SFM信号不能得到理想的时频聚集性,多项式WVD(Polynomial WVD, PWVD)<sup>[18-19]</sup>将瞬时频率建模成一个高阶多项式,虽在一定程度上可消除WVD分析高阶多项式相位信号时非线性相位产生的交叉项影响,但在不同信号分量的能量强弱差距较大时,难以提取弱分量的微多普勒特征,且阶数不能取太高;3)低可观测运动目标回波通常表现为微弱的调频信号,在低SNR条件下,如果该信号的频率偏移非常小,Cohen类方法的时频分辨力下降,从而影响参数估计的准确性<sup>[20]</sup>。图5给出了STFT、WVD、SPWVD多分量信号相参积累后结果,进一步验证了不同方法的优缺点。

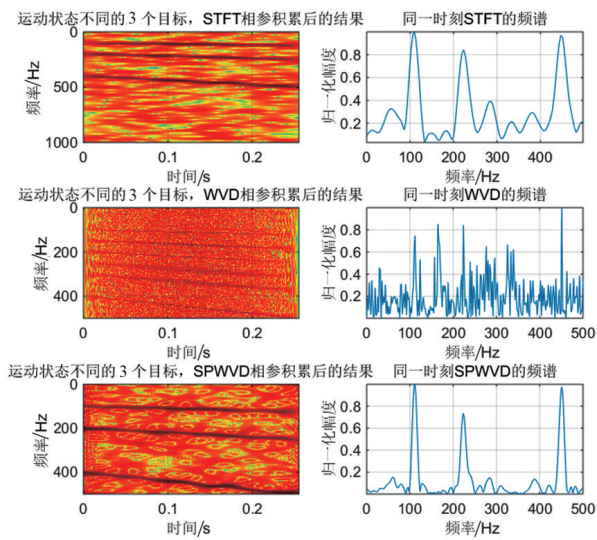


图5 运动状态不同的3个目标经STFT、WVD、SPWVD处理后的结果

Fig. 5 Comparisons of STFT, WVD, and SPWVD for three targets with different motions

基于时频变换的动目标检测技术的总体思路是根据待检测的动目标的运动状态,选择合适的时频分析方法,变换至相应的时频域,根据运动目标的时频曲线的幅值或随时间的变化规律,进行检测,最终根据是否超过门限判断运动目标的有无。但时频分析类方法存在运算量大、时频分辨率差、参数估计精度差等缺陷,很难满足雷达对低可观测运动目标精细化处理的要求<sup>[4]</sup>。

### 2.2 动目标信号分数域相参积累处理技术

分数阶傅里叶变换(fractional FT, FRFT)是在统一的时间域和频率域上对信号进行分析,是经典傅里叶变换的广义表示(图6)。与FT比较,FRFT更加广泛地运用在信号分析方面,FRFT可以理解为chirp基分解,而FRFT域不同阶数的LFM信号将显示出不同的能量聚集特性,因此可以实现对线性调频信号的检测<sup>[21-23]</sup>。

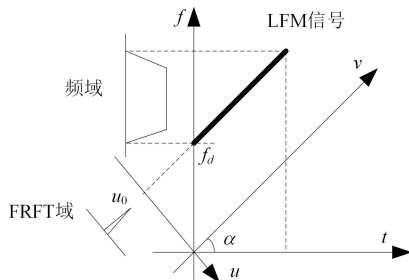


图6 LFM信号在时频平面的谱分布

Fig. 6 Spectrum distribution in time-frequency domain of LFM signal

FRFT是一种线性变换,适合多分量非平稳信号分析,具备快速算法,适合工程运算。此外,FRFT对LFM信号有良好

的能量聚集性,即能够积累匀加速运动目标信号,改善SCR,因此,适合低可观测机动目标的检测和参数估计,例如强海杂波背景中的动目标检测<sup>[24-26]</sup>(图7)。

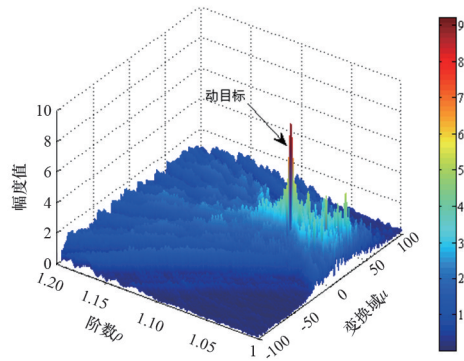


图7 X波段雷达海上动目标回波的FRFT谱图分布

Fig. 7 FRFT spectrum of marine moving target using X band radar

借鉴STFT的思路,通过增加窗函数,然后进行FRFT,得到短时FRFT(Short-time FRFT, ST-FRFT)<sup>[27]</sup>,使得FRFT具有表征信号局部特征的能力,能够得到信号任意时刻的FRFT谱。因此,通过沿时间轴移动窗函数<sup>[28]</sup>,STFRFT能够很好地描述和分析时变信号,尤其是具有调频(FM)特性的机动目标信号(图8)。

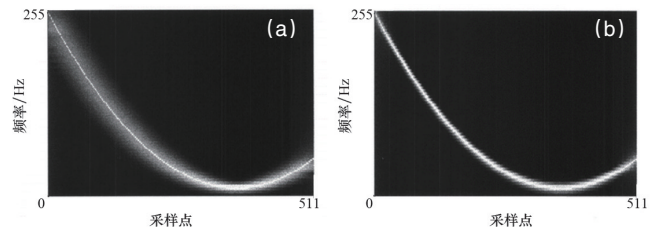


图8 单分量LFM信号的STFT谱和STFRFT谱

Fig. 8 STFT and STFRFT spectrum of a single LFM signal

### 2.3 动目标微多普勒信号特征提取技术

近年来,微多普勒理论成为目标精细化处理领域的一个新的的重要途径。目标的微动特征反映了目标的精细运动和几何结构对电磁散射的综合调制特征,微多普勒反映了多普勒变化特性,为雷达目标特征提取和识别提供了新的途径<sup>[13]</sup>。目前,微多普勒的广义概念可以理解为目标或目标组成部分在径向相对雷达的小幅非匀速运动或运动分量<sup>[29-30]</sup>,例如,人体的四肢摆动、心跳和呼吸运动、直升机旋翼、鸟类翅膀的运动、汽车发动机的振动、船舶的晃动、导弹的颤动、飞机螺旋桨的转动等。图9为直升机目标和海面快艇的微多普勒谱。目标的微动特征在一定程度上反映了目标固有的运动属性,与目标的结构和电磁散射特性有着密切关联,因此,微多普勒特征是低可观测运动目标的探测和识别的重要手段和途径。

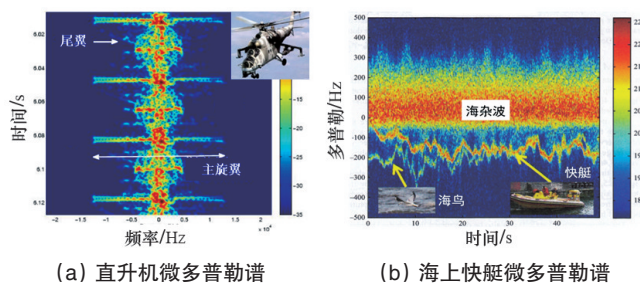


图9 运动目标的微多普勒谱  
Fig. 9 Micro-Doppler of moving target

微多普勒特征提取和分析方法以非平稳、时变信号、多分量信号处理技术为主要手段,如时频分析方法、信号分解分析方法、相位匹配分析方法和参数模型分析方法等。也有学者从图像处理的角度对微多普勒信号进行检测和提取。在谱图域,正弦调制的微多普勒信号表现为曲线或直线,采用图像处理方法中的Hough变换(Hough transform, HT)和Radon变换(Radon transform, RT)提取时频平面上的曲线参数,可获得目标的微动参数<sup>[31]</sup>。鉴于微多普勒能够精细描述信号特征,增加了信息量,并且可以很好地刻画信号本身的频率变化,因此具备提高运动目标检测和识别性能的可能性。

#### 2.4 长时间相参积累目标机动特征提取技术

雷达搜索模式能够获得广域的监视范围,但目标波束驻留时间短,无法对低慢小目标进行进一步精细测量。利用雷达的凝视观测模式能够有效降低雷达系统的动态范围、延长目标观测时间、提高速度分辨率,提取目标的精细特征,从而有利于获取微多普勒、积累目标能量和抑制背景杂波。随着雷达体制的发展,波束指向灵活的阵列雷达,如数字相控阵雷达和多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)雷达,能够在一定角度范围内任意分配波束的方向和能量,其凝视观测模式非常有助于低可观测目标的探测,随之产生和发展了长时间信号积累处理方法。目标能量的长时间积累检测技术包括相参积累检测技术和进行非相参积累的检测前跟踪技术。

对于目标能量的长时间相参积累检测来说,主要是解决长时间积累过程中目标能量在距离和多普勒平面上的二维扩散(即所谓的包络走动和多普勒扩散现象)问题。包络走动补偿方面,王俊等<sup>[32]</sup>分别采用距离拉伸联合时频分析方法、速度分段方法、频分包络移位补偿方法和时域包络插值补偿方法来校正目标的包络走动;文献[33]采用keystone变换校正包络走动,其优点是无需已知目标速度,但受多普勒模糊的影响,该方法不适用于重频较低的情况。许稼等<sup>[34]</sup>提出的Radon-Fourier变换方法在距离-慢时间二维平面中利用离散傅里叶变换沿目标运动参数给出的观测值轨迹进行积分,实现目标能量的长时间相参积累。该方法本质是距离走动校正后的广义多普勒滤波器组,将Hough变换、MTD和Radon变换等方法统一起来,是一种优秀的长时间积累方法。在只考虑

多普勒扩散而不考虑包络走动的情况中,通常研究较多的是目标具有恒定径向加速度的情况。此时,目标回波在慢时间维是一个线性调频信号,可采用Wigner-Hough变换、Radon-Wigner变换、chirplet变换、Radon-ambiguity变换、FRFT等时频分析方法对其进行能量积累<sup>[35-37]</sup>。另外,检测线性调频信号的方法还包括:Dechirping方法,通过补偿目标加速度对应的二次相位来校正多普勒扩散;循环自相关方法通过消除线性调频信号的二次项,实现对线性调频信号的检测。

若能同时完成距离和多普勒徙动的补偿,则称为长时间相参积累法,该方法极大地提高目标信号的积累增益,能够提高雷达对低可观测机动目标的探测能力。文献[38]-[40]从对目标机动信息(加速度和急动度)的利用以及算法实时性角度出发,提出多种基于长时间相参积累的机动目标检测方法。所提方法实质均可看作是带有变换参数的广义多普勒滤波器组,扩展了传统脉间相参积累处理技术利用信号信息的维度,能够灵活匹配并积累杂波背景中的高阶运动目标信号,同时补偿长时间积累过程中的距离和多普勒徙动,有效抑制背景杂波和噪声,提高积累增益,并能获得目标的运动点迹。图10给出了基于长时间相参积累的动目标检测方法与传统MTD检测方法的处理结果对比。

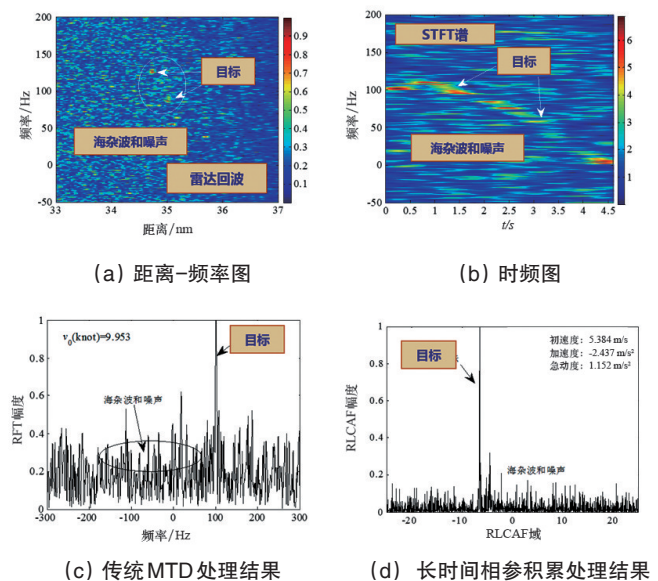


图10 基于长时间相参积累的动目标检测方法  
(S波段实测雷达数据)

Fig. 10 Moving target detection methods via long-time coherent integration (S-band real radar data)

#### 2.5 杂波与动目标非线性特征差异提取技术

传统的海杂波中目标检测技术研究主要依赖于研究人员提出某种特征,并期望所提特征对海杂波和目标具有稳定的差异度和线性可分性,但该过程有2方面因素没有系统全面考虑:一是,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、风速风向及吹拂时间、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,并依各参数呈现不同的非线性规律,这些信息对增强不同频段杂波与目标特征差异度十分有益,但在形成特征过程中没有充分利用;二是,在存在目标情况下,目标与杂波间不是简单的线性叠加,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会损失部分信息,导致仅有局部信息用于区分海杂波和目标,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(不考虑信杂比极低的情况),而这一信息在目标检测中也没有充分考虑<sup>[41]</sup>。

非线性特性是杂波复杂性的直观体现,相关文献已经从散射机制和实测数据等方面研究了海杂波的非线性特性。

从内容上看,非线性是对传统统计分布特性的补充和完善,属于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,尤其是海杂波<sup>[42-43]</sup>。分形模型可以较好地描述信号粗糙程度,背景与目标的粗糙程度不同,其分形特征有所差异,因此可将该差异性用于目标检测(图11)。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,文献[44]-[45]分析了海杂波数据在FRFT域的统计特性,给出了分形特征的提取方法和无标度区间,并在此基础上分别利用临近距离单元或临近时刻的雷达回波信号在FRFT域的分形维数、斜距、分形拟合误差和分形维数方差的差异作为检测统计量设计相应的检测方法,检测性能优于传统的时域分形检测法。

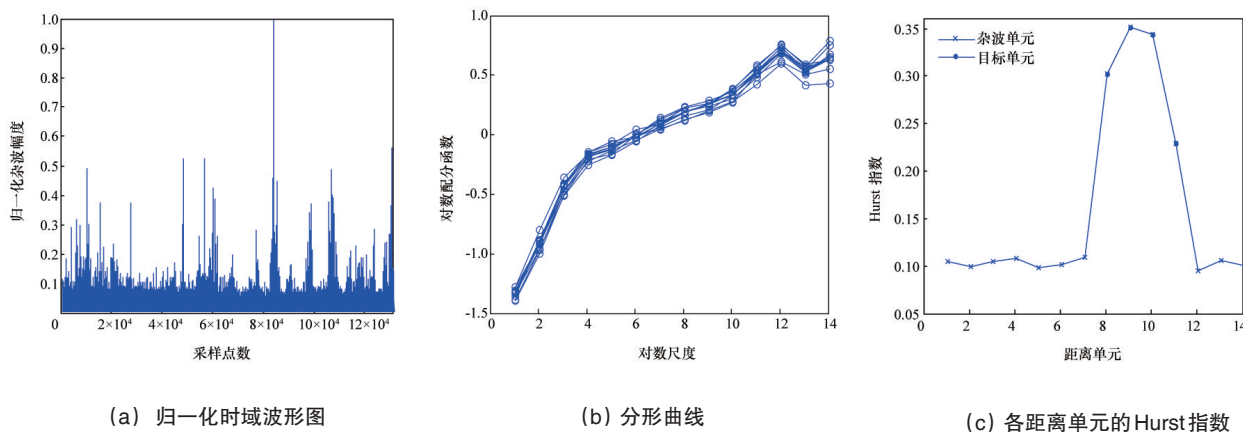


图11 基于分形特征差异的目标检测方法(X波段实测雷达数据)  
Fig. 11 Target detection via differences of fractal characteristics (X-band real radar data)

### 2.6 动目标高分辨稀疏时频表示域处理技术

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,即采用稀疏时频分析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,从而更有利于获得目标精细特征<sup>[46-47]</sup>。目前,美国麻省理工学院(MIT)成立了专门的实验室对该领域进行技术攻关,提出了稀疏傅里叶变换(sparse FT, SFT)方法<sup>[48]</sup>,《MIT Technology Review》将其评选为2012年全球十大突破性技术。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 $B$ 点短序列并作DFT运算,可将傅里叶变换的计算复杂度由 $O(N \lg N)$ 降低至 $O(k \lg N)$ ( $N$ 为信号长度, $k$ 为稀疏度)。尽管目前SFT算法存在很多不同版本,但整体上都遵循如图12所示的理论框架<sup>[49]</sup>。但是,SFT不能反映信号频率的时变特性,也不能处理非匀速运动目标信号。FRFT对匀加速运动目标有良好的能量聚集性和检测性能,但其需要旋转角匹配搜索,运算量较大。结合SFT和FRFT的优势,北京理工大学陶然等给出了稀疏分数阶傅里叶变换(sparse FRFT, SFRFT)的实现方法。将SFRFT应用于雷达非平稳时变信号分析,在获得高分辨的信号谱特征的同时抑制

背景噪声和杂波,改善SCR,在大数据量处理时,相比FRFT运算量显著降低。

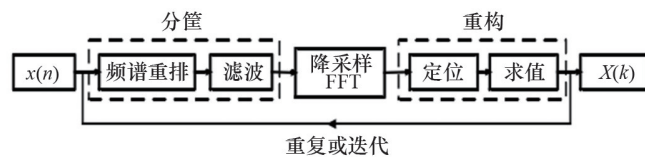


图12 SFT理论框架  
Fig. 12 SFT flowchart

SFT理论体系促进了信号处理的一次飞跃,但其仍存在以下2个方面的缺陷:一是,SFT假设信号的离散频率落在DFT的网络上。事实上,受网格大小等因素的影响,信号频率可能落在网格点之间,导致离网频率泄漏到其他频率单元,显著降低信号的稀疏性。二是频率检测问题,大多数SFT算法假设信号的稀疏度已知,通过比较DFT的幅度预设阈值,然而,在实际应用中,信号确切的稀疏度可能是未知或变化的,这给算法对于实测雷达数据的处理造成了局限。针对SFT理论体系的上述缺陷,文献[50]在SFT和SFRFT理论框架的基础上,结合时频分布(TFD)类动目标检测和稀疏表示方

法的优势,建立了短时稀疏TFD(ST-STFD)原理框架,提出短时稀疏傅里叶变换(ST-SFT)和短时稀疏分数阶傅里叶变换(ST-SFRFT)雷达动目标检测方法<sup>[51-52]</sup>,并应用于海上目标微

动特征提取及检测中。实测雷达数据验证表明,该方法在时间-稀疏域能够实现时变信号的高分辨率复杂度时频表示(图13)。

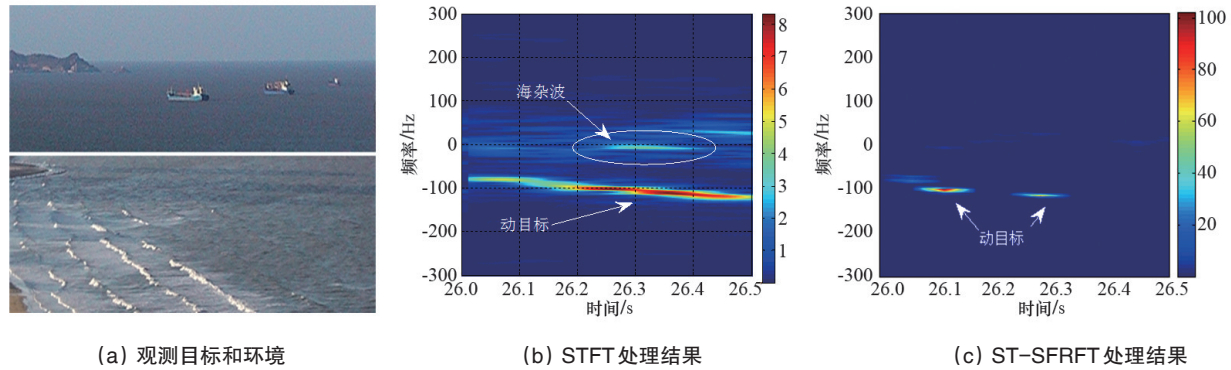


图13 海上动目标信号稀疏时频表示域处理结果(S波段实测雷达数据)

Fig. 13 Moving target detection in sparse time-frequency domain (S-band real radar data)

## 2.7 多手段动目标信息感知与融合技术

人类在获得感觉、知觉、表象等信息的基础上,通过归纳和演绎、分析和综合的方法,以概念、判断、推理的形式,实现对事物由浅入深、由低到高、由片面到全面的认识,如图14所示。信息感知与融合过程就是采用信息技术模拟人类认识事物的一种过程,是人类认识和改造世界不可或缺的技术途径和方法<sup>[53]</sup>。所谓“感”,是指信息获取手段,即利用声、电、光、磁等各类传感器来“获取”多维空间各类数据信息;“知”是对信息的正确理解,是目的,即“知道”或“知晓”。“感”是手段,“知”是目的,“融合”是途径,三者互为“依存”,不可分割。多传感器信息感知与融合的过程包括分布式检测融合、位置融合、属性融合、态势评估和威胁评估<sup>[54]</sup>。

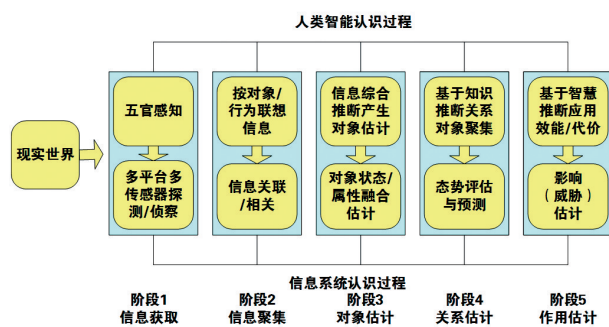


图14 人类智能认知过程

Fig. 14 Intelligent perception of human being

检测、跟踪与识别是目标探测中的重要环节,依靠单一手段难以实现。多传感器对动目标的综合监视系统集成雷达、光电和AIS/ADS等多种手段于一体,综合应用优势互补的多种探测手段,实现对目标的协同感知,掌握监视区域内目标态势,识别具有潜在威胁的非合作目标(图15)。



图15 多传感器目标综合监视系统

Fig. 15 Multisensor target surveillance system

## 2.8 基于深度学习的动目标特征智能学习和识别技术

深度学习是机器学习中一种基于对数据进行表征学习的方法。深度学习通过组合低层特征形成更加抽象的高层表示属性类别或特征,以发现数据的分布式特征表示<sup>[55]</sup>。深度学习的优势是用非监督式或半监督式的特征学习和分层特征提取高效算法替代手工获取特征。表征学习的目标是寻求更好的表示方法并创建更好的模型从大规模未标记数据中学习这些表示方法。目标运动特征参数与运动状态、雷达观测方式、环境和背景均有密切的关系,试图从数学建模和特性认知的角度去寻找参数之间的关系,并基于特征差异开展运动目标识别,是一种可行的技术途径,但复杂的运动形式和环境因素,其内在的关系有时难以用模型和参数的方式描述清楚<sup>[56]</sup>。采用深度学习等智能学习的思路,通过构建多层卷积神经网络,发现高维数据中的复杂结构,在图像识别和语音识别等领域经过验证具有很强的特征表述能力和较高的分类识别准确率<sup>[57]</sup>。

雷达目标识别关键在于特征的选取和提取过程,目标信号特征包括电磁散射特征、多普勒特征、极化特征、一维距离像起伏特征、二维图像特征等,这些特征依赖于观测条件,在不同条件下特征差异很大,普适性不强,而特征的提取过多

依赖于算法本身,受限于运算量和精度。深度学习能够获取目标深层本质特征信息,从而有助于提高识别精度。可以将深度学习的方法,如深度神经网络、卷积神经网络、深度置信网络和递归神经网络,用于微动特征描述、提取和识别,通过设置不同的隐藏层数和迭代次数,获取数据各层次的特征表达,然后和近邻方法相结合,对目标进行识别。图16为基于多模态卷积神经网络并行深度网络微动特征的描述与场景辨识方法。

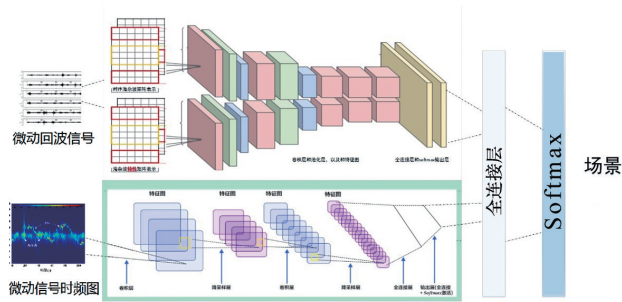


图16 基于卷积神经网络的微动特征提取

Fig. 16 Micromotion feature extraction based on convolutional neural network

### 3 结论与展望

精细化处理极大扩展了信息维度,提高了雷达对动目标的认知能力,从而为雷达目标识别提供了技术支持。未来,雷达动目标探测将紧密围绕以下3方面协同发展。

一是信号处理水平的发展。雷达信号处理技术经历了从时、频域、空的单域处理,再到时频、空时的二维处理,再到空时频的多域处理的发展历程<sup>[5]</sup>。其本质是多维度和多尺度信息的融合利用。融合利用多维度信息,可对回波信号进行更精细化描述,改善检测、估计、识别、评估和决策的性能<sup>[1]</sup>。

二是探测手段和系统层面的发展。从多传感器的融合利用,如微波雷达、磁探测、红外、光学、声纳等;到多平台的不同视角和空间的探测,如地基、舰载、机载、星载和临近空间平台;以及雷达自身体制的发展,如认知雷达、MIMO阵列雷达、分布式相参雷达、无源雷达、凝视雷达、量子雷达、频控阵雷达、微波光子雷达、软件化雷达、太赫兹雷达等<sup>[58]</sup>。新体制的利用,有可能使得雷达的系统架构、工作模式、探测机制、回波信号特征、信息处理、探测性能等方面发生根本性变化,进而为动目标探测提供新的手段。

三是深度学习等智能处理的发展。深度学习善于从原始输入数据中挖掘越来越抽象的分布式特征表示,而这些表示具有良好的泛化能力<sup>[59]</sup>。它解决了过去人工智能中被认为难以解决的一些问题。且随着训练数据集数量的显著增长以及芯片处理能力的剧增,它在目标检测和识别等领域成效卓然,采用深度学习的思想,能够对目标运动特征进行深度挖掘,实现精细化描述。

当前该领域已不再满足于检测是否有无目标的层次,而

是向着更精细化和智能化处理的方向发展,随着多波段、多视角、多时相、多极化、多维度和多尺度信息技术的应用,以及多学科的交叉融合,雷达低可观测动目标探测和识别技术也将迎来更大发展。

### 参考文献 (References)

- [1] 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.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(11): 30-38.
- [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 Xiaolong, Guan Jian, 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] 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.  
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.
- [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 Yingning, Xia Xianggen, et al. Radar signal processing method of space-time-frequency focus-before-detects[J]. Journal of Radars, 2014, 3(2): 129-141.
- [6] 陈唯实, 李敏. 雷达探鸟技术发展与应用综述[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 7-17.  
Chen Weishi, Li Jing. Review on development and applications of avian radar technology[J]. Modern Radar, 2017, 39(2): 7-17.
- [7] 罗宏伟. 试论大型活动安保工作中“低慢小”目标的防范与处置[J]. 武警学院学报, 2015, 31(9): 27-30.  
Luo Hongwei. Strengthening LSS target defense for large activities[J]. Journal Of Chinese People's Armed Police Force Academy, 2015, 31(9): 27-30.
- [8] Chen X L, Guan J, Bao Z, et al. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional fourier transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2013, 52(2): 1002-1018.
- [9] Chen X L, Guan J, Liu N B, 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.
- [10] 徐文, 鄢社锋, 季飞, 等. 海洋信息获取、传输、处理及融合前沿研究评述[J]. 中国科学(信息科学), 2016, 46(8): 1053-1085.  
Xu Wen, Yan Shefeng, Ji Fei, et al. Marine information gathering, transmission, processing, and fusion: Current status and future trends [J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8): 1053-1085.
- [11] 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 Xiaolong, Guan Jian, Dong Yunlong, et al. Sea clutter suppression and micromotion target detection in sparse domain[J]. Chinese Journal of Electronics, 2016, 44(4): 860-867.
- [12] Lei Z, Ming L, Xiaowei Z, 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.
- [13] Chen V C, Fayin L, 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.
- [14] 庄钊文, 刘永祥, 黎湘. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520-525.  
Zhuang Zhaowen, Liu Yongxiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 35(3): 520-525.
- [15] Luo Y, Zhang Q, Yuan N, et al. Three-dimensional precession feature extraction of space targets in distributed radar networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 50(2): 1313-1329.
- [16] 李开明, 李长栋, 李松, 等. 基于Gabor变换的微动目标微多普勒分析与仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2010, 11(1): 40-94.  
Li Kaiming, Li Changdong, Li Song, et al. Analysis and simulation for micro-Doppler information of micro-motion target based on Gabor transformation[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2010, 11(1): 40-94.
- [17] Wu X, Liu T. Spectral decomposition of seismic data with reassigned smoothed pseudo Wigner-Ville distribution[J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 68(3): 386-393.
- [18] Chandra Sekhar S, Sreenivas T V. Effect of interpolation on PWVD computation and instantaneous frequency estimation[J]. Signal processing, 2004, 84(1): 107-116.
- [19] Wang Y, Jiang Y C. New time-frequency distribution based on the polynomial Wigner-Ville distribution and L class of Wigner-Ville distribution[J]. IET Signal Processing, 2010, 4(2): 130-136.
- [20] 许世军, 罗迎, 陈天平. 低信噪比条件下雷达目标微多普勒信息提取[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 148-150.  
Xu Shijun, Luo Ying, Chen Tianping. Extraction of micro-doppler information with low signal-to-noise ratio[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 148-150.
- [21] Almeida L B. The fractional Fourier transform and time-frequency representations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3084-3091.
- [22] 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, Wang Yue. The fractional Fourier transform and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [23] 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.
- [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.  
Chen Xiaolong, 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.
- [25] 陈小龙, 关键, 于仕财, 等. 海杂波背景下基于FRFT的多运动目标检测快速算法[J]. 信号处理, 2010, 26(8): 1174-1180.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, Yu Shicai, et al. A fast detection algorithm of multiple moving targets in sea clutter based on FRFT[J]. Journal of Signal Processing, 2010, 26(8): 1174-1180.
- [26] 陈小龙, 于仕财, 关键, 等. 海杂波背景下基于FRFT的自适应动目标检测方法[J]. 信号处理, 2010, 26(11): 1614-1620.  
Chen Xiaolong, Yu Shicai, Guan Jian, et al. An adaptive detection algorithm for moving target at sea in FRFT domain[J]. Journal of Signal Processing, 2010, 26(8): 1174-1180.
- [27] 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.
- [28] 陈小龙, 刘宁波, 王国庆, 等. 基于高斯短时分数阶傅里叶变换的海面微动目标检测方法[J]. 电子学报, 2014, 42(5): 971-977.  
Chen Xiaolong, Liu Ningbo, Wang Guoqing, et al. Gaussian short-time fractional Fourier transform based detection algorithm of target with micro-motion at sea[J]. Chinese Journal of Electronics, 2014, 42(5): 971-977.
- [29] Bai X R, Xing M D, Zhou F, et al. Imaging of micromotion targets with rotating parts based on empirical-mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [30] Stankovic L, Thayaparan T, Dakovic M, et al. Micro-Doppler removal in the radar imaging analysis[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49(2): 1234-1250.
- [31] Zhang Q, Yeo T S, Tan H S, et al. Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [32] 王俊, 张守宏. 微弱目标积累检测的包络移动补偿方法[J]. 电子学报, 2000, 28(12): 56-59.  
Wang Jun, Zhang Shouhong. Study on the motion compensation of range migration for weak moving target detection[J]. Chinese Journal of Electronics, 2000, 28(12): 56-59.
- [33] 霍凯, 黎湘, 姜卫东, 等. 基于分段伪Keystone变换的快速旋转目标检测[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2073-2079.  
Huo Kai, Li Xiang, Jiang Weidong, et al. Fast rotating target detection based on the segmental pseudo Keystone transform[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(9): 2073-2079.
- [34] 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.
- [35] Yang L S, Zhang Z J, Guo F Y. Fast algorithm for Radon-ambiguity transform[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2016, 10(3): 553-559.
- [36] 张天骐, 全盛荣, 强幸子, 等. 基于多尺度Chirplet稀疏分解和Wigner-Ville变换的时频分析方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(6): 1333-1339.  
Zhang Tianqi, Quan Shengrong, Qiang Xingzi, et al. Time-frequency analysis method based on multi-scale Chirplet sparse decomposition and Wigner-Ville transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(6): 1333-1339.
- [37] Su J, Tao H H, Xie J, et al. Imaging and Doppler parameter estimation for maneuvering target using axis mapping based coherently integrated cubic phase function[J]. Digital Signal Processing, 2017, 62: 112-124.
- [38] 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 Transaction on Signal Processing, 2014, 62(4): 939-953.
- [39] Chen X L, Guan J, Liu N B, 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.
- [40] 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): 265-269.
- [41] Guan J, Liu N B, Huang Y, et al. Fractal poisson model for detecting target within spiky sea clutter[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(2): 411-415.
- [42] Luo F, Zhang D T, Zhang B. The fractal properties of sea clutter and their applications in maritime target detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1295-1299.
- [43] 关键, 刘宁波, 宋杰, 等. 分形理论在目标检测中应用[J]. 现代雷达, 2012, 34(2): 12-18.  
Guan Jian, Liu Ningbo, Song Jie, et al. Application of target detection based on fractal theories[J]. Modern Radar, 2012, 34(2): 12-18.

- [44] 刘宁波, 关键, 王国庆, 等. 基于海杂波FRFT谱多尺度Hurst指数的目标检测方法[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1847-1853.  
Liu Ningbo, Guan Jian, Wang Guoqing, et al. Target detection within sea clutter based on multi-scale hurst exponent in FRFT domain[J]. Chinese Journal of Electronics, 2013, 41(9): 1847-1853.
- [45] Chen X L, Guan J, He Y, et al. Detection of low observable moving target in sea clutter via fractal characteristics in FRFT domain[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2013, 7(6): 635-651.
- [46] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [47] 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, Xia Xianggen. Parametric Sparse representation and its applications to radar sensing[J]. Journal of Radars, 2016, 5(1): 1-7.
- [48] Gilbert A C, 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.
- [49] 仲顺安, 王雄, 王卫江, 等. 稀疏傅里叶变换理论及研究进展[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(2): 111-118.  
Zhong Shunan, Wang Xiong, Wang Weijiang, et al. Recent advances in the sparse Fourier transform[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(2): 111-118.
- [50] 陈小龙, 于晓涵, 关键, 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.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, Yu Xiaohan, et al. Radar micro-doppler signature extraction and detection via short-time sparse time-frequency distribution. JEIT, 2017, 39(5): 1017-1023.
- [51] Chen X L, Guan J, He Y. High resolution extraction of radar micro-doppler signature using sparse time-frequency distribution[C]. 32nd International Union of Radio Science General Assembly and Scientific Symposium (URSI 2017 GASS), Montréal, August 19-26, 2017.
- [52] Chen X L, Yu X H, Guan J, et al. High-resolution sparse representation of micro-doppler signal in sparse fractional domain[C]. The 2nd EAI International Conference on Machine Learning and Intelligent Communications (MLICOM 2017), Weihai, August 5-6, 2017.
- [53] 何友, 王国宏, 陆大瑜, 等. 多传感器信息融合及应用[J]. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
He You, Wang Guohong, Lu Dajin, et al. Multi sensor information fusion and its application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics, 2010.
- [54] 何友, 王国宏, 关欣, 等. 信息融合理论及应用[J]. 北京: 电子工业出版社, 2010.  
He You, Wang Guohong, Guan Xin, et al. The information fusion theory and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics, 2010.
- [55] 余凯, 贾磊, 陈雨强, 等. 深度学习的昨天、今天和明天[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(9): 1799-1804.  
Yu Kai, Jia Lei, Chen Yuqiang, et al. Deep learning: Yesterday, today, and tomorrow[J]. Journal of Computer Research and Development, 2013, 50(9): 1799-1804.
- [56] 周志文, 黄高明, 高俊, 等. 一种深度学习的雷达辐射源识别算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(3): 77-82.  
Zhou Zhiwen, Huang Gaoming, Gao Jun, et al. Radar emitter identification algorithm based on deep learning[J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(3): 77-82.
- [57] 徐丰, 王海鹏, 金亚秋. 深度学习在SAR目标识别与地物分类中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(2): 136-148.  
Xu Feng, Wang Haipeng, Jin Yaqiu. Deep learning as applied in SAR target recognition and terrain classification[J]. Journal of Radars, 2017, 6(2): 136-148.
- [58] 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 Jianyu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 19-27.
- [59] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 39(8): 1697-1716.  
Jiao Licheng, Yang Shuyuan, Liu Fang, et al. Seventy years beyond neural networks: Retrospect and prospect[J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(8): 1697-1716.

## Radar refined processing and its applications for low-observable moving target

CHEN Xiaolong<sup>1</sup>, GUAN Jian<sup>1</sup>, HUANG Yong<sup>1</sup>, YU Xiaohan<sup>2</sup>, LIU Ningbo<sup>2</sup>, DONG Yunlong<sup>2</sup>, HE You<sup>2</sup>

1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China

2. Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical University, Yantai 264001, China

**Abstract** As the main equipment of target detection and surveillance, the radar plays an important role in the air and sea target monitoring, early warning detection and other public and defense security applications. Due to the complex detection environment and the variety of the targets, the echo has a low observability. It is difficult for the radar detection performance to meet the actual demand, and we face the weak target detection problem in a complex environment. In recent years, with the development of the radar system and the radar signal processing technology, the radar gains the ability to obtain fine target characteristics, and by extending the signal dimension, a new way is provided for the radar target detection and recognition. This paper reviews the connotation and the characteristics of the low observable moving target, the challenge of the radar detection and the key technology of fine processing, focusing on the engineering applications based on the measured data of the radar. Finally, the development direction of fine processing is discussed.

**Keywords** radar moving target detection; low-observable target; refined processing; feature extraction; sparse representation; target recognition (责任编辑 刘志远)