

雷达动目标短时稀疏 分数阶傅里叶变换域检测方法

陈小龙¹, 关 键¹, 于晓涵², 何 友²

(1. 海军航空工程学院电子信息工程系, 山东烟台 264001; 2. 海军航空工程学院信息融合研究所, 山东烟台 264001)

摘 要: 复杂背景下的动目标检测技术是雷达目标探测的关键技术和难点之一, 亟需发展和研究高时频分辨率、大数据量高效以及适用于多分量信号分析的方法和手段. 该文结合经典时频分析技术和高分辨稀疏域信号处理的优势, 提出短时稀疏分数阶傅里叶变换(ST-SFRFT)并用于雷达动目标检测和参数估计, 实现时变信号高分辨时频表示的同时, 改善 SCR, 提高复杂环境下雷达动目标检测的性能. 实测对海雷达数据验证表明, 所提方法在抗杂波以及参数估计精度等方面较经典时频动目标检测方法有明显优势.

关键词: 雷达动目标检测; 稀疏表示; 时频分析; 分数阶傅里叶变换; 稀疏时频分布

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)12-3030-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.12.028

Radar Detection for Moving Target in Short-Time Sparse Fractional Fourier Transform Domain

CHEN Xiao-long¹, GUAN Jian¹, YU Xiao-han², HE You²

(1. Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China;
2. Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China)

Abstract: Moving target detection in complex environment is one of the key points and difficulties in radar target detection. It is necessary to develop theory and method of high time-frequency resolution, high efficiency for big data, and suitable for multi-signals analysis. In this paper, the concept of short-time sparse fractional Fourier transform (ST-SFRFT) is proposed in association with the advantages of classical time-frequency analysis and high-resolution signal processing in sparse domain. The ST-SFRFT is then used for radar moving target detection and parameter estimation, which can achieve high-resolution representation of time-varying signal and improve signal-to-clutter ratio as well. The detection performance of moving target in complex environment is improved. Real experiment using a marine radar was carried out and the results indicate that the proposed method shows distinct advantages in anti-clutter and parameter estimation over classical time-frequency-based moving target detection methods.

Key words: radar moving target detection; sparse representation; time-frequency analysis; fractional Fourier transform; sparse time-frequency distribution

1 引言

雷达作为目标探测和监视的主要手段, 在公共安全以及国防安全领域应用广泛^[1,2]. 然而受复杂环境以及目标复杂运动特性的影响, 目标回波极其微弱, 具有低可观测性, 使得雷达对杂波背景下动目标的探测性

能难以满足实际需求^[3]. 雷达低可观测动目标检测技术成为关键制约因素, 也是世界性难题. 低可观测动目标主要包括“低(低掠射角)、慢(慢速)、小(小尺寸)、快(机动)、隐(隐身)”等^[3], 无论是在时域还是在频域, 回波信杂比(Signal-to-clutter Ratio, SCR)都很低, 难以实现稳健、可靠和快速的检测^[4].

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-07-06; 责任编辑: 郭游

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61501487, No. 61401495, No. U1633122, No. 61471382, No. 61531020); 国防科技基金(No. 2102024); 航空科学基金(No. 20162084005, No. 20162084006); 中国科协“青年人才托举工程”(No. YESS20160115)和“泰山学者”专项经费资助

传统的动目标检测 (Moving Target Detection, MTD) 方法仅适用于匀速运动目标, 针对强杂波和干扰条件下的机动目标检测, 雷达回波将不满足传统信号处理中平稳性要求, 导致 MTD 方法失效. 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^[5], 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, 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. 若目标运动特性与变换方法不匹配, 难以达到显著提升 SCR 的效果. 目前, 雷达动目标检测多从如何有效积累目标回波信号, 改善 SCR 的角度考虑^[6], 而达到期望的增益需要大量的回波脉冲进行相参积累, 对雷达实时信号处理提出严峻挑战. 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, 有效提取信号特征并用于检测成为亟需解决的问题. 亟需发展和研究高时频分辨率、大数据量高效以及适用于多分量信号分析的方法和手段.

时频分析方法是将信号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, 则参数估计问题转化为信号的稀疏表示问题^[7,8]. 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^[9]. 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 Time-frequency Distribution, STFD) 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^[10,11]. 因此, 高分辨 STFD 理论为非平稳信号处理提供了新的思路 and 方向, 也将极大提高雷达动目标的探测能力^[12]. 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, 提出了傅里叶变换的稀疏计算方法 (Sparse Fourier Transform, SFT)^[13], 被誉为 2012 年的十大信息处理技术进展. 然而, 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. 分数阶傅里叶变换 (Fractional Fourier Transform, FRFT) 对匀加速运动目标有良好的能量聚集性和检测性能^[14], 但其需要旋转角匹配搜索, 运算量较大, 并且缺少时域定位的功能, 不能对任意时刻信号局部频率特性分析.

本文在 STFD 的框架基础上^[15], 通过构建稀疏 FRFT, 并加入滑动的短时窗函数, 提出短时稀疏 FRFT (Short-time Sparse FRFT, ST-SFRFT) 并设计雷达动目标检测和参数估计方法, 结合 TFD 技术以及稀疏表示优化算法的优势, 能够实现高分辨时变信号时频表示的同时, 改善 SCR, 提高复杂环境下雷达动目标检测的性

能. 实测对海雷达数据验证表明, 所提方法在抗杂波、运算效率以及参数估计精度等方面较传统 MTD 和 TFD 类方法有明显优势.

2 雷达动目标回波时频分布模型

假设目标朝向雷达运动, 且仅考虑径向速度分量, 则目标的距离为时间的多项式函数

$$r_s(t_m) = \sum_i a_i t_m^{i-1} = r_0 - vt_m - \frac{1}{2!} v' t_m^2 - \frac{1}{3!} v'' t_m^3 - \dots, t_m \in [-T_n/2, T_n/2] \quad (1)$$

式中, $r_s(t_m)$ 为雷达与目标的视线距离, t_m 表示在相参处理间隔内脉冲-脉冲间的慢时间, v 是目标速度, T_n 为相参积累时间.

假设雷达发射 LFM 信号, 经过解调和脉压后, 目标雷达回波可表示为^[16]

$$s_{PC}(t_m) = A_r \text{sinc} \left[B \left(t - \frac{2r_s(t_m)}{c} \right) \right] \exp \left(-j \frac{4\pi r_s(t_m)}{\lambda} \right) \quad (2)$$

式中, A_r 是回波幅度, B 为发射信号带宽, c 代表光速, λ 为波长.

因此, 动目标雷达回波可建模为幅度起伏的调频 (Frequency Modulated, FM) 信号, 即

$$x(t_m) = \sum_{i=1}^I a_i(t_m) e^{j\varphi_i(t_m)} \quad (3)$$

式中, $a_i(t_m)$ 为信号包络, $\varphi_i(t_m)$ 为信号相位.

在实际工程应用中, 可根据雷达观测和信号积累时间的长短, 将动目标回波信号近似为一次调频 (Linear FM, LFM) 信号, 描述目标的速度和加速度运动状态^[6]. 尽管高阶相位信号 (如, 二次调频信号或多项式信号) 能够更精确地描述时变信号, 但后续的相参积累和参数搜索过程极其复杂, 运算量大, 在实际中并不常用. 对于式的动目标信号模型, 其时频分布 (TFD) 可表示为

$$\rho_x(t_m, f) = \sum_{i=1}^I a_i^2(t_m) \delta[f - \dot{\varphi}_i(t_m)/2\pi] \quad (4)$$

式中, $\dot{\varphi}_i(t_m)$ 为信号频率的估计.

上式表示, 信号可被描述为任意时刻的不同瞬时频率分量 (一次或二次调频、高次调频) 的叠加, 在时间-频率平面内, 通过稀疏分解, 动目标回波信号可在 $f = \dot{\varphi}_i(t_m)$ 处呈现冲击函数, 表明能量得到积累. 因此, 由 $\rho_x(t_m, f)$ 构成的时频域即为信号的稀疏表示域, 即稀疏时频分布. 例如, 对于单一分量的 LFM 信号, $a_1(t_m) = 1$, $\dot{\varphi}_1(t_m) = 2\pi(f_0 + \mu t_m)$, μ 为信号调频率.

3 动目标回波 ST-SFRFT 高分辨稀疏时频表示

由上节可知, 目标由于运动产生多普勒, 其回波多

普勒谱实质是非匀速平动和转动等共同作用的结果. 目标的非匀速平动导致多普勒变化, 具有线性或二次调频特征, 表现为频谱展宽, 传统基于傅里叶变换的频谱分析方法难以有效反映该特性; 而目标或目标部件除质心平动以外的振动、转动和加速运动等微动形式^[17], 回波多普勒谱具有复杂的调制效应, 使得回波频谱出现旁瓣或展宽, 具有明显的时变性, 即频率随时间变化, 同时也反映了对目标运动特征的精细化描述. 因此, 需要扩展维度至时频域, 同时提高信号的时频分辨能力.

时频表示技术(TFD)得到广泛应用, 如线性时频分析方法(短时傅里叶变换、FRFT等)、二次型时频分析方法(Wigner-Vill分布(Wigner-Vill Distribution, WVD)等), 其本质是在构建的完备基函数上的投影分解, 但其缺陷在于时频分辨率较差、某些算法受交叉项影响, 算法较为复杂, FRFT为参数搜索类方法, 需要进行变换角的搜索以匹配时变信号, 且参数估计精度受时频分辨率和搜索步长的限制. 由于运动目标信号和背景噪声或杂波具有不同的稀疏性, 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, 则可以实现信号的高分辨表示^[12]. 同时, 将稀疏分解的局部优化思想引入时频分析, 构建时间-稀疏域, 即稀疏时频分布(STFD), 进一步提升算法性能和效率. 因此, 传统的TFD技术是STFD的特例.

对于信号的稀疏表示, 集合 $g = \{g_i; i = 1, 2, \dots, K\}$, 其元素是张成整个 Hilbert 空间 $H = R^N$ 的单位矢量, 并且 $K \geq N$, 称集合 g 为原子库(字典), 集合中的元素为原子. 对于任意信号 $f \in H$ 可以展开为一组原子的线性组合, 即对信号 x 做逼近, $x = \sum_{i=1}^I \beta_i g_i$, i 为原子个数, 系数 β_i 的大小表示信号与原子的相似程度.

信号 $x(t_m)$ 的TFD是稀疏表示的特例, 其原子可由信号在TFD域中的频率估计组成,

$$\rho_x(t_m, f) = \sum_{i=1}^I \beta_i(t_m) h(t_m) g_i(t_m, f) \quad (5)$$

式中, $\rho_x(t_m, f)$ 为信号 $x(t_m)$ 的稀疏时频分布, $h(t_m)$ 为窗函数, $g_i(t_m, f)$ 为稀疏表示的原子.

求解式的信号稀疏表示问题可转化为最优化问题, 可近似采用 l_1 范数的最小化求解

$$\rho_x = \underset{\rho_x}{\operatorname{argmin}} \|\rho_x(t_m, f)\|_1, \text{ s. t. } \mathcal{O}\{\rho_x(t_m, f)\} = b \quad (6)$$

式中, $\rho_x \in R^N$, $b \in R^K$, b 为实数, \mathcal{O} 为 $K \times N$ 的稀疏算子. 式(6)可松弛为不等约束, 即

$$\rho_x = \underset{\rho_x}{\operatorname{argmin}} \|\rho_x(t_m, f)\|_1, \text{ s. t. } \|\mathcal{O}\{\rho_x(t_m, f)\} - b\|_2 \leq \varepsilon \quad (7)$$

当 $\varepsilon = 0$ 时, 式(6)和式(7)具有相同的形式. 当 \mathcal{O} 为分

数阶傅里叶变换(FRFT)时, b 为FRFT域幅值, 则短时稀疏FRFT(ST-SFRFT)可表示为

$$F^\alpha = \underset{F^\alpha}{\operatorname{argmin}} \|F^\alpha(t_m, f)\|_1, \quad (8)$$

$$\text{ s. t. } \|\mathcal{O}\{F^\alpha(t_m, f)\} - f(\alpha, u)\|_2 \leq \varepsilon$$

式中, $F^\alpha(t_m, f)$ 为ST-SFRFT时频分布, α 为旋转角, u 为ST-SFRFT域, (α, u) 与信号中心频率 f 和调频率 μ 的关系为^[14]

$$\begin{cases} f = u \csc \alpha / S \\ \mu = -\cot \alpha / S^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中, 尺度因子 $S = \sqrt{T_n / f_s}$, f_s 为采样频率.

4 ST-SFRFT域雷达动目标检测方法

4.1 算法流程

利用动目标回波信号在FRFT域中的稀疏性, 结合TFD对信号瞬时频率表征的优势, 提出ST-SFRFT域动目标检测方法, 在动目标的时频-稀疏域进行检测, 仅保留最为稀疏的目标信号成分, 以期保证信号能量聚集的同时实现时变信号的时频表示, 从而提高雷达动目标检测和参数估计性能. 算法流程图如图1所示.

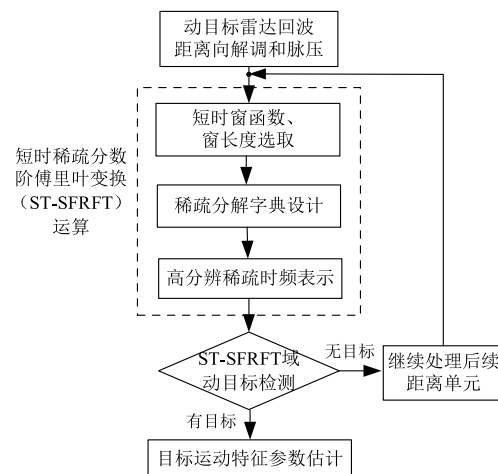


图1 ST-SFRFT域雷达动目标检测方法流程图

包括如下几个步骤:

(1) 雷达回波解调和脉冲压缩. 将接收并经过放大和限幅处理后得到的雷达回波数据进行距离向和方位向采样, 通常距离向采样间隔等于雷达距离分辨单元, 方位向采样频率等于脉冲重复频率, 以保证在距离向和方位向的信号处理时间中, 运动目标的回波能够被完整采集.

(2) ST-SFRFT运算, 包括短时窗函数选取、稀疏分解字典设计、CS优化和高分辨稀疏表示等.

(a) 短时窗函数、窗长度选取

窗函数可选取矩形窗, $h(\tau) = 1, |\tau| \leq T_n$, 或采用

高斯窗函数, $h(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma^2}\right)$, $|\tau| \leq T_n$, σ 为标准差, 可通过调整该参数改善信号的频率分辨率。

合适的窗长度也是决定参数估计精度和分辨率的重要因素, 一方面, 在窗长度内需保证采样点足够多, 以提高相参积累增益并保证正确估计运动参数; 另一方面, 窗长度越窄信号的逼近性能好, 使得在有限的信号观测时间范围内, 很好地描述多普勒的时变特性, 因此, 最佳时宽应最大程度地满足两方面的要求, 若 $\varphi(t_m)$ 为连续多项式函数, 并且 $(n+2)$ 阶可导, 则最佳时宽为^[14]

$$T_{\text{opt}}^{(n)} = \frac{n+2}{\sqrt{4^n n!}} / G \quad (10)$$

式中, $G = \max |\varphi^{(n+2)}(t_m)|$ 。对于建模为 LFM 的动目标回波 ($n=0$), 窗长度应不大于调频率平方根的倒数

$$T_n \leq T_{\text{opt}} = \sqrt{1/\mu} \quad (11)$$

(b) 稀疏分解字典设计

动目标多普勒频率与速度近似成正比, 复杂运动目标在一段短的时间里, 可用 LFM 信号作为其一阶近似, 因此, 对于以非匀速平动为主要运动方式的动目标, 如导弹、飞行器、快艇等, 可采用 chirp 基构造稀疏分解字典, 设定搜索精度和范围, 假设中心频率 f_l 的搜索范围为 $f_l \in [0, F]$, 搜索个数为 L , 中心频率分辨率为 $\Delta f = F/L$, 调频率 μ_m 的搜索范围为 $\mu_m \in [0, K]$, 搜索个数为 M , 调频率分辨率为 $\Delta \mu = K/M$, 则构造的过完备 chirp 字典为 $L \times M$ 的矩阵

$$\mathbf{G}_s = \begin{bmatrix} g_s(f_1, \mu_1) & g_s(f_1, \mu_2) & \cdots & g_s(f_1, \mu_M) \\ g_s(f_2, \mu_1) & g_s(f_2, \mu_2) & \cdots & g_s(f_2, \mu_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_s(f_L, \mu_1) & g_s(f_L, \mu_2) & \cdots & g_s(f_L, \mu_M) \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $g_s(f_l, \mu_m) = \exp(j2\pi f_l t + j\pi \mu_m t^2)$, $l = 1, 2, \dots, L$; $m = 1, 2, \dots, M$, $f_l = 2v_l/\lambda$, v_l 为目标初速度分量, $\mu_m = 2a_m/\lambda$, a_m 为目标加速度分量。

(c) CS 优化和高分辨稀疏表示

可采用凸优化理论进行求解, 如基追踪降噪法 (Basis Pursuit Denoising, BPDN)^[18],

$$\min \lambda \|\rho_x(t, f)\|_1 + \frac{1}{2} \|\rho_x(t, f) - b\|_2^2 \quad (13)$$

此外, 还可利用 SFFT 快速算法^[13], 实现 ST-SFRFT 的快速计算。

(3) 遍历所有距离搜索单元, 进行动目标信号稀疏域检测

将式输出的二维 ST-SFRFT 域信号幅值作为检测统计量, 与给定虚警概率下的检测门限进行比较, 如果检测统计量低于检测门限, 判决为没有动目标信号, 继续处理后续的检测单元, 若检测统计量高于检测门限,

则判决为存在动目标信号, 并记录 ST-SFRFT 域的最大峰值坐标,

$$\{\alpha_0, u_0\} = \arg \max_{\alpha, u} |F^\alpha(t_m, f)| \underset{h_0}{\overset{h_1}{>}} \eta \quad (14)$$

式中, η 为检测门限, 峰值位置 (α_0, u_0) 对应动目标回波信号的中心频率和调频率 $(f_0, \mu_s) = (u_0 \csc \alpha_0 / S, -\cot \alpha_0 / S^2)$, 继续滑动时间窗 $h(t_m)$, 计算该时间窗内, 最佳变换角 α_0 或匹配调频率 μ_s 条件下的 ST-SFRFT, 从而得到不同时刻信号的瞬时频率。

(4) 目标运动参数估计

根据动目标所在 ST-SFRFT 域的峰值坐标估计目标的运动参数, 即初速度估计值 \hat{v}_0 , 加速度估计值 \hat{a}_s 。

$$\begin{cases} \hat{v}_0 = \frac{\lambda f_0}{2} = \frac{\lambda}{2S} u_0 \csc \alpha_0 \\ \hat{a}_s = \frac{\lambda \mu_s}{2} = -\frac{\lambda}{2S^2} \cot \alpha_0 \end{cases} \quad (15)$$

4.2 运算量分析

由于 ST-SFRFT 包含稀疏优化过程, 其实现可通过传统的基于 CS 的凸优化理论以及参数搜索进行求解, 其运算量取决于搜索的精度和范围, 在文献[9]所设置的仿真条件下, 若允许的参数估计绝对误差在 1Hz ($< 10\%$), 则采样点数达到 500, 误差趋向稳定。此外, ST-SFRFT 由于是 SFT 的广义形式, 可以通过 MIT 实验室的快速 SFT (SFST)^[13] 来实现, 其基本思想是通过频谱重排、窗函数滤波、降采样 FFT, 将 N 点的 FFT 转换为 B 点 FFT, 然后在通过信号重构的方法, 如哈希映射和混叠同余法, 由 B 点 FFT 的结果重构出信号完整的频谱。则离散 SFRFT (SDFRFT) 的计算复杂度如下式所示^[19]

$$M_{\text{SDFRFT}} = 2N + (\omega + B \cdot \log_2 B/2 + 2 \cdot k) \times l_{\text{loc}} + (\omega + B \cdot \log_2 B/2) \times l_{\text{est}} + \text{card}(I) \times l_{\text{total}} \quad (16)$$

式中, N 为输入信号长度, B 为降采样 FFT 的长度, k 为稀疏度, 即频域大值的个数, ω 为滤波时所采用窗函数的时域窗长, l_{loc} 为定位循环次数, l_{est} 为估值循环次数, $l_{\text{total}} = l_{\text{loc}} + l_{\text{est}}$ 为总循环次数, I 为定位循环后, 频域大值点坐标映射到时域的原象集合, 集合大小为 $2kN/B$ 。

假设短时窗函数 $h(t)$ 长度为 N_1 , 则 ST-SFRFT 的计算复杂度为

$$M_{\text{ST-SFRFT}} = \frac{N}{N_1} [2N_1 + (\omega + B \cdot \log_2 B/2 + 2 \cdot k) \times l_{\text{loc}} + (\omega + B \cdot \log_2 B/2) \times l_{\text{est}} + \text{card}(I) \times l_{\text{total}}] \quad (17)$$

对于信号稀疏度为 1 ($k=1$), 即单分量信号, 定位循环次数与估值循环次数相等 ($l_{\text{loc}} = l_{\text{est}} = l$), 则 ST-SFRFT 的计算复杂度可近似为

$$O(M_{\text{ST-SFRFT}}) \propto 2N + 2N(B \cdot \log_2 B/2) \times l/N_1 \quad (18)$$

即与短时窗函数长度以及降采样 FFT 长度有关。因此,

相比凸优化计算方法,计算量大幅下降.

5 实测数据验证与分析

采用 S 波段对海雷达数据验证所提算法, S 波段对海雷达数据分析如图 2 所示, 其中, 图 2(a) 为海上目标及观测环境, 风向风速为东南风 3~4 级, 海况等级约为

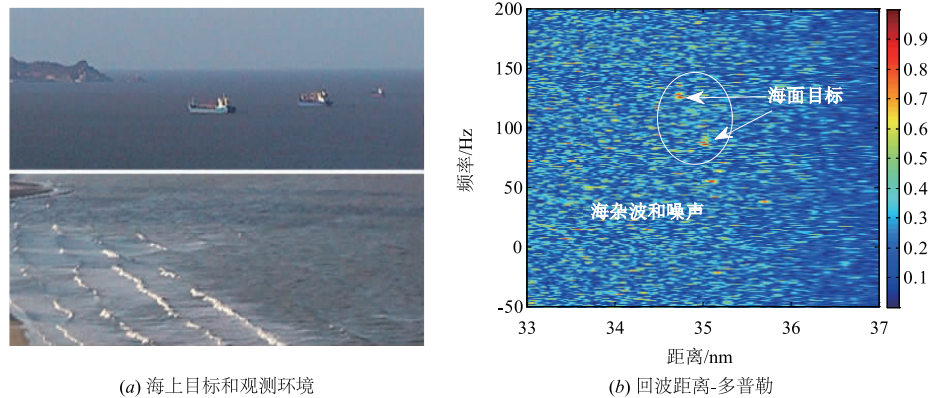


图2 S波段对海雷达数据分析

图 3 为目标回波单元的短时傅里叶变换 (STFT) 谱, 受海面起伏和目标自身运动的影响, 海面目标的多普勒随时间变化, 具有时变特性, 频谱能量集中在 100 Hz 附近, 但频域中的海杂波和噪声仍然影响微弱信号的检测, 检测后虚警严重, 通过 0.5 s 处的切面 STFT 谱图 (图 3(b)), 在 107 Hz 处有一峰值, 估计目标速度为 9.953 节 (kn), 海杂波和目标归一化幅度之差为 0.38, 难以实现高检测概率. 采用提出的 ST-SFRFT 对海上动目标检测, 得到图 4 所示的处理结果. 通过对比图 3 和图 4 可知: (1) ST-SFRFT 具有较高的时频分辨

率, 由图 2(b) 的雷达回波距离-多普勒分析可知, 在 35 nm 附近存在微弱的海面动目标, 仅通过幅度难以从强海杂波中发现目标, 脉间相参积累后得到的多普勒谱幅度不明显, 被海杂波和噪声所遮蔽, 具有低可观测性.

率, 目标谱峰特征明显, 原因在于利用了稀疏分解的优点, 仅保留最为稀疏的信号成分, 因此, 既保证了信号的能量聚集, 又实现了动目标信号的时频表示; (2) 目标运动参数估计精度得到提升, 根据 ST-SFRFT 的稀疏分解系数可估计出目标的运动瞬时速度为 9.556 kn, 加速度为 0.92 m/s^2 . 采用 ST-SFRFT 方法能够更好地表征信号的时变特征, 剩余虚警明显降低, 表明海杂波在该稀疏域中无稀疏峰值, 从而进一步提高了雷达对低可观测动目标的检测和参数估计性能.

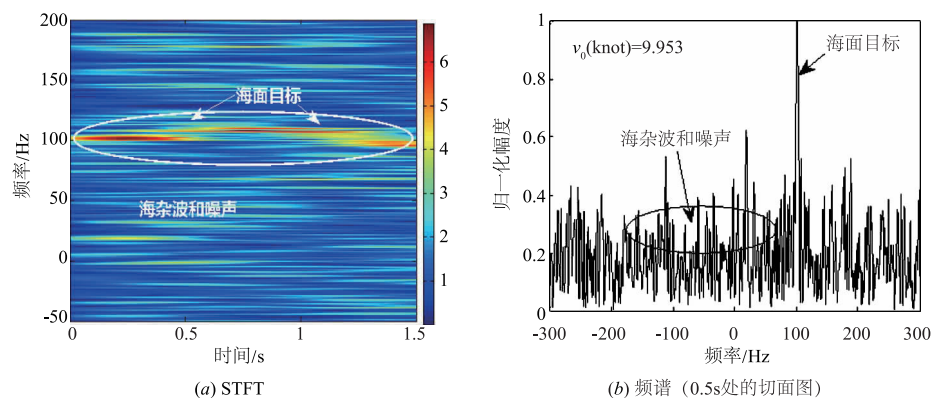


图3 海上动目标信号的STFT时频分析

表 1 定量比较了在不同信杂比条件下 ($\text{SCR} = 0\text{dB}, -5\text{dB}$), 经典时频动目标检测方法 (WVD、FRFT、STFT) 和所提 ST-SFRFT 方法的海上动目标检测性能, 其中海杂波为图 2 所示实测数据, 动目标为仿真信号, 具有加速机动特征, 虚警概率设为 $P_{\text{fa}} = 10^{-4}$, 通过

Monte Carlo 仿真计算得到低 SCR ($\text{SCR} = -5\text{dB}$) 的检测概率, 并统计计算时间. 对比可知, 在 $\text{SCR} = 0\text{dB}$ 时, 基于 FT 的时频分析方法 (STFT) 检测性能最低, 难以有效表征时变信号 (LFM), 而 ST-SFRFT 方法可通过稀疏优化算法, 在微弱信号最优稀疏域设计检测方法, 提升

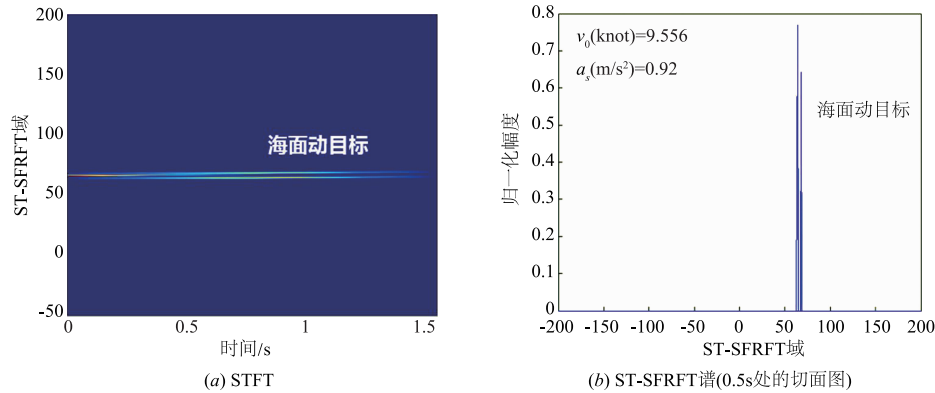


图4 基于ST-SFRFT的海上动目标检测结果

能量聚集程度,相比 FRFT 检测性能提升明显;在 SCR = -5dB 时, WVD 由于受强海杂波的影响,其多分量之间的交叉项遮蔽了动目标幅值,使得检测性能下降明显,而所提方法是在目标的最佳稀疏域进行检测,提高了杂波与动目标的差异特征区分度,从而仍能保证较好的检测性能($P_d = 87.75\%$). 值得说明的是,由于 ST-SFRFT 的计算过程为优化搜索过程,采用基于 CS 的优化理论算法,如基追踪降噪法(Basis Pursuit DeNoising, BPDN)^[18],运算量较大,为此,可采用快速 SFT (SFFT)提高运算效率^[13].

表 1 动目标检测性能比较

参数 \ 方法	WVD	FRFT	STFT	ST-SFRFT
$P_d(\%)$ (SCR = 0dB)	67.54	74.35	62.78	93.43
$P_d(\%)$ (SCR = -5dB)	34.64	68.26	49.26	87.75
计算时间* (ms)	10.54	14.51	7.56	29.46 ⁽¹⁾ , 12.68 ⁽²⁾

* 计算机配置: Intel Core i7-4790 3.6GHz CPU; 16G RAM; Matlab R2014a. (1) 基于 BPDN 优化算法, (2) 基于 SFFT 的快速算法

6 结束语

本文结合 TFD 技术以及稀疏表示优化算法的优势,通过构建稀疏 FRFT,并加入滑动的短时窗函数,提出一种稀疏时频分析方法,即短时稀疏 FRFT (ST-SFRFT) 并用于雷达动目标检测和参数估计. 该方法能够实现高分辨时变信号时频表示的同时,改善 SCR,提高复杂环境下雷达动目标检测的性能. 实测对海雷达数据验证表明,所提方法在抗杂波以及参数估计精度等方面较经典时频动目标检测方法有明显优势,为进一步提升雷达杂波抑制和动目标检测能力提供了新的思路和途径. 后续将继续研究适合工程应用的短时稀疏时频分析的快速计算方法.

参考文献

- [1] 何友,黄勇,关键,陈小龙. 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, Chen Xiaolong. An overview on radar target detection in sea clutter [J]. Modern Radar, 2014, 36(12): 1-9. (in Chinese)
- [2] 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 Xiang-gen, et al. Radar signal processing method of space-time-frequency focus-before-detects [J]. Journal of Radars, 2014, 3(2): 129-141. (in Chinese)
- [3] Chen Xiaolong, Guan Jian, Liu Ningbo, Zhou Wei, You He. 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.
- [4] Li Xiaolong, Cui Guolong, Yi Wei, Kong Lingjiang. Radar maneuvering target detection and motion parameter estimation based on TRT-SGRFT [J]. Signal Processing, 2016, 133:107-116.
- [5] 赵彤璐,廖桂生,杨志伟. 基于短时迭代自适应-逆 Radon 变换的微多普勒提取方法[J]. 电子学报,2016,44(3):505-513.
Zhao Tonglu, Liao Guisheng, Yang Zhiwei. Micro-Doppler extraction based on short-time iterative adaptive approach and inverse radon transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3): 505-513. (in Chinese)
- [6] Guan Jian, Chen Xiaolong, Huang Yong, 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.
- [7] 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 Lichen, Yang Shuyuan, Liu Fang, et al. Development

- and prospect of compressive sensing [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1651 – 1662. (in Chinese)
- [8] Donoho David L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289 – 1306.
- [9] 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 micro motion target detection in sparse domain [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(4): 860 – 867. (in Chinese)
- [10] GHOLAMI. A. Sparse time-frequency decomposition and some applications [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(6): 3598 – 3604.
- [11] Patrick Flandrin, Pierre Borgnat. Time-frequency energy distributions meet compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(6): 2974 – 2982.
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 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. *Fractional Fourier Transform and Its Applications* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 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.
Chen Xiaolong, Guan Jian, Yu Xiaohan, et al. Radar micro-Doppler signature extraction and detection via short-time sparse time-frequency distribution [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1017 – 1023. (in Chinese)
- [16] Chen Xiaolong, Guan Jian, Bao Zhonghua, 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.
- [17] Chen Victor C., Li Fayin, Ho Shen-Shyang, 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.
- [18] Gill P R, Wang A, Molnar A. The in-crowd algorithm for fast basis pursuit denoising [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(10): 4595 – 4605.
- [19] Liu Shengheng, 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.

作者简介



陈小龙 男, 1985 年生, 山东烟台人. 讲师, 中国电子学会青年科学家俱乐部成员, 主要从事雷达信号处理、动目标检测、杂波抑制等研究工作. 承担和参与国家自然科学基金等项目十余项, 发表学术论文 50 余篇, 授权国家发明专利 15 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”.

E-mail: cxlxl1209@163.com



关键 男, 1968 年生, 辽宁锦州人. 教授, 博士生导师. 主要从事雷达目标检测与跟踪、侦察图像处理和信息融合等研究工作. “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.

E-mail: guanjian96@tsinghua.org.com



于晓涵 女, 1991 年生, 河北沧州人, 博士生. 研究领域包括雷达动目标检测、稀疏信号处理等.

E-mail: yxhyxh0803@163.com



何友 男, 1956 年 10 月生, 吉林磐石人. 中国工程院院士, 教授, 博士生导师. 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.