

基于高斯短时分数阶 Fourier 变换 的海面微动目标检测方法

陈小龙¹, 刘宁波², 王国庆², 关 键¹, 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: 海上目标随海面颠簸导致姿态变化, 引起回波功率调制效应, 导致回波多普勒体现时变和非平稳特性. 为此, 本文将微多普勒理论应用于海杂波中弱目标检测, 提出一种基于高斯短时分数阶 Fourier 变换 (GSTFRFT) 的海面微动目标检测方法. 首先, 建立海面目标的平动和三维转动回波模型; 然后, 基于海尖峰判别方法对回波信号进行数据筛选, 改善信杂比, 并采用 GSTFRFT 对微动信号进行增强处理, 利用海面目标与海杂波的微动特征差异设计恒虚警检测方法; 最后, 通过 GSTFRFT 域滤波, 提取信号的微动特征并得到瞬时频率. 实测雷达数据仿真结果验证了算法的有效性, 具有在强海杂波中检测微弱目标的能力.

关键词: 微动目标; 海尖峰; 高斯短时分数阶 Fourier 变换; 目标检测; 特征提取

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)05-0971-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.05.021

Gaussian Short-Time Fractional Fourier Transform Based Detection Algorithm of Target with Micro-Motion at Sea

CHEN Xiao-long¹, LIU Ning-bo², WANG Guo-qing², GUAN Jian¹, 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 University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: The attitude of target at sea may vary with the fluctuation of sea surface, which induces the effect of power modulation of radar echo, and also the Doppler reflects time-varying and nonstationary properties. In this paper, micro-Doppler theory is applied to weak target detection within sea clutter, and an algorithm of detecting micro-motion target at sea is proposed via Gaussian short-time fractional Fourier transform (GSTFRFT). Firstly, signal model of target on the sea surface is established including translation and 3-D rotation movements. Then, radar returns are selected based on sea spikes identification for better signal-to-clutter ratio. Moreover, micro-motion signal is enhanced via GSTFRFT, and signature differences between target and sea clutter are utilized for designing constant false alarm ratio detector. Finally, micro-motion signature and instantaneous frequency can be extracted and obtained by filtering in GSTFRFT domain. Simulation results with real datasets validate the effectiveness of the algorithm, which is qualified for detecting weak target in strong sea clutter environment.

Key words: micro-motion target; sea spikes; Gaussian short-time fractional Fourier transform; target detection; feature extraction

1 引言

高海况条件下可靠、稳健的弱目标检测技术始终是雷达信号处理领域的难题^[1]. 传统基于统计理论的目标检测方法将海杂波视为随机过程, 但目标模型和杂波模型均呈多样化发展趋势, 尤其是杂波分布模型, 在复杂环境中往往不成立或不完全成立, 这就使经典目标检测方法由于模型失配而不能取得预期的检测结果. 当高分

辨率雷达以低擦地角照射粗糙海面或高海况条件下, 雷达屏幕出现强杂波尖峰, 体现出明显的时变特性^[2], 并且, 海面目标的复杂运动 (非匀速运动或三维转动), 导致多普勒频率随时间非线性变化^[3], 使得目标能量积累效果差, 降低了雷达检测性能.

近年来, 随着高分辨雷达和信号处理水平的提高, 微多普勒理论已成为目标探测与识别领域的重要研究方向^[4]. 微动是由目标的特殊结构在特定的受力作用下

引起的,目标微动状态常常是独一无二的,反映了目标的精细特征^[5].因此,微多普勒非常适于分析具有非平稳特征的海杂波以及海面目标回波信号.目前,时频分析方法能够给出特定时间和特定频率范围的能量分布,被广泛用于分析微多普勒的特性^[6];线性时频表示,如短时 Fourier 变换(Short-time Fourier Transform, STFT),无交叉项,但受不确定原理的制约,时频分辨率较低;非线性时频表示,如 Wigner-Ville 分布(Wigner-Vill Distribution, WVD),在多目标存在的情况下,运算量大且存在交叉项.分数阶 Fourier 变换(Fractional Fourier Transform, FRFT)对非平稳信号尤其是线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号有良好的能量聚集性,无交叉项的干扰^[7],但 FRFT 缺少时域定位的功能.在 FRFT 中加入滑动的短时窗函数,得到短时 FRFT(Short-time FRFT, STFRFT)^[8],通过窗函数的滑动完成整个时间上的信号局部性质分析,可得到在任意时刻的该段信号的频率变化,非常适合对微多普勒信号的分析 and 处理.

本文将微多普勒理论引入对海雷达目标检测领域,提出利用微动特征检测微弱目标的思路,在建立海面目标微动模型的同时,采用基于高斯窗函数的 STFRFT(Gaussian STFRFT, GSTFRFT)方法分析微动特征,提高时频聚集性,并寻找海杂波与微动目标回波信号特性的差异,改善信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR).该方法拓展了信号利用的维度,可进一步提升雷达微弱目标检测能力,仿真实验验证了该方法的有效性.

2 海面微动目标雷达回波调制模型

对于海面刚体目标^[5],目标的微动主要包括非匀速平动(匀加速运动和其它高阶运动)以及三轴转动(俯仰、横滚和偏航).假设在雷达观测时间内,目标回波不存在距离徙动现象^[9].观测几何关系如图 1 所示,包括目标固定参考坐标系 $C_{\text{ref}} = (X, Y, Z)$ 、目标运动坐标系 $C_{\text{mov}} = (x, y, z)$ 以及 RLOS 坐标系 $C_{\text{rlos}} = (q, r, h)$.坐标原点 o 设在舰船质心上,并认为坐标轴 ox 、 oy 和 oz 分别为舰船的横滚轴、俯仰轴和偏航轴, (x, y, z) 坐标绝对值分别表示目标的长度、宽度和高度.

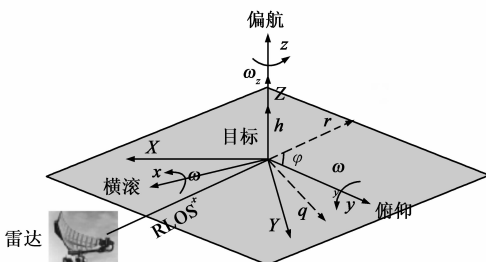


图1 岸基对海雷达观测海面目标几何关系

2.1 平动目标微多普勒调制模型

为了获得高分辨率和降低有效带宽,假设雷达发射 LFM 信号

$$s_t(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_c t + \frac{1}{2} k t^2\right]\right\} \quad (1)$$

式中, $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & |u| > 1/2 \end{cases}$, f_c 是雷达载频, T_p 为带宽, $k = B/T_p$ 为调频率, B 为带宽.雷达与目标的视线距离(Radar Line-of-Sight, RLOS)为 $R_s(t)$,则 t 时刻雷达接收的信号表示为

$$s_r(t) = \sigma_r \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t - \tau) + \frac{k}{2}(t - \tau)^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中, σ_r 为目标的散射截面积,则时间延迟为 $\tau = 2R_s(t)/c$, c 代表光速.假设海面舰船朝向雷达运动,且仅考虑径向速度分量,则 RLOS 为时间的多项式函数,采用泰勒级数展开并保留前三项作为 RLOS 的近似,

$$R_s(t) = R_0 - v_0 t - \frac{1}{2} a_s t^2 \quad (3)$$

式中, v_0 为目标运动初速度, a_s 为加速度.回波信号经解调和脉冲压缩运算后,表示为

$$s_{IF}(f, t) = \sigma_r \text{sinc}[B(t - \tau)] \exp(-j2\pi f_c \tau) \quad (4)$$

将 τ 代入上式中,并对相位取时间导数,得到由于目标匀加速运动导致的瞬时频率

$$f_i = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR_s(t)}{dt} = \frac{2}{\lambda} (v_0 + a_s t) \quad (5)$$

式中, $\lambda = c/f_c$ 为雷达波长.由上式可知,动目标回波信号受速度和加速度调制,可近似为一阶多项式信号.同时,由于式(5)中的多普勒具有时变特性,可看作微动信号的一种.

2.2 转动目标微多普勒调制模型

设海面微动目标作横滚、俯仰和偏航运动,则目标绕中心做旋转运动可用旋转矩阵 \mathbf{R}_{z-y-x} 表示,分别为三维旋转分量的乘积

$$\mathbf{R}_{z-y-x} = \mathbf{R}(\theta_x) \mathbf{R}(\theta_y) \mathbf{R}(\theta_z) \quad (6)$$

其中, $\mathbf{R}(\theta_x)$, $\mathbf{R}(\theta_y)$, $\mathbf{R}(\theta_z)$ 分别为横滚、偏航和俯仰矩阵, θ_x , θ_y 和 θ_z 为对应的旋转角度^[5].

首先,将目标 C_{mov} 坐标系通过旋转矩阵 \mathbf{R}_{z-y-x} 变换至 C_{ref} 坐标系

$$C_{\text{ref}} = \mathbf{R}_{z-y-x} C_{\text{mov}} = \begin{bmatrix} a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z \\ a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z \\ a_{31}x + a_{32}y + a_{33}z \end{bmatrix} \quad (7)$$

然后,根据图 1 中舰船和雷达的几何关系,通过变换得到目标在 C_{rlos} 坐标系中的运动状态

$$C_{\text{rlos}} \triangleq \begin{bmatrix} q \\ r \\ h \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\varphi) C_{\text{ref}} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} C_{\text{ref}} \quad (8)$$

假设雷达和舰船在同一个坐标平面,则可通过推导式(9)的第二行得到 RLOS 距离

$$r(t) = \sin\varphi(a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z) + \cos\varphi(a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z) \quad (9)$$

$$\begin{cases} a_{11} = \cos\theta_y \cos\theta_z \\ a_{12} = -\cos\theta_y \sin\theta_z \\ a_{13} = \sin\theta_y \\ a_{21} = \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \cos\theta_x \sin\theta_z \\ a_{22} = -\sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_x \cos\theta_z \\ a_{23} = -\sin\theta_x \cos\theta_y \end{cases} \quad (10)$$

对式(9)时间求导,则由目标旋转运动产生的微多普勒可表示为

$$f_r = \frac{2v_r(t)}{\lambda} = \frac{2}{\lambda} \frac{dr(t)}{dt} \quad (11)$$

为了计算方便,分别分析三种旋转运动,转动角速度分别为 $\omega_x = \theta_x/t$, $\omega_y = \theta_y/t$, $\omega_z = \theta_z/t$, $\omega = \varphi/t$.

(1) 横滚运动

在此情况下, $\theta_y = \theta_z = 0$,因此目标到雷达的距离可表示为

$$r(t) = \sin\varphi \cdot x + \cos\varphi(\cos\theta_x \cdot y - \sin\theta_x \cdot z) \quad (12)$$

多普勒频率为

$$f_{rx} = \frac{2}{\lambda} [\cos\varphi \cdot \omega x - \sin\varphi \cdot \omega (\cos\theta_x \cdot y - \sin\theta_x \cdot z) - \cos\varphi (\sin\theta_x \cdot \omega_x y + \cos\theta_x \cdot \omega_x z)] \quad (13)$$

在较短的观测时间范围内,旋转角度 φ 非常小, $\cos\varphi \gg \sin\varphi$, $\sin\theta_x \approx \omega_x t$, $\cos\theta_x \approx 1$. 式(13)简化为

$$f_{rx} \approx \frac{2}{\lambda} \cos\varphi (\omega x - \omega_x z - \omega_x^2 y t) \quad (14)$$

上式表明横滚运动产生的多普勒具有调频特性,其频率与角速度以及舰船的运动坐标有关.

(2) 偏航运动

此时 $\theta_x = \theta_z = 0$,同样采用近似计算,则由偏航运动产生的多普勒可表示为

$$f_{ry} \approx \frac{2}{\lambda} \cos\varphi (\omega x + \omega \omega_y z t) \quad (15)$$

上式表明由于有调频项的存在,多普勒谱发生偏移和展宽.

(3) 俯仰运动

$\theta_x = \theta_y = 0$,则多普勒可表示为

$$f_{rz} \approx \frac{2}{\lambda} \cos\varphi (\omega x + \omega_x z - \omega \omega_y z t - \omega_y^2 y t) \quad (16)$$

由上述刚体目标微多普勒调制模型的讨论中得知,在雷达发射 LFM 信号照射点目标的前提下,目标的微多普勒频率由非匀速平动和三维转动引起的,可建模为多分量调频信号,其幅度和频率受海况影响.微动目标在较短时间范围内,可用 LFM 信号作为调频信号

的一阶近似,则同一距离单元内的海面微动目标回波可建模为

$$\begin{aligned} x(t) &= s(t) + c(t) \\ &= \sum_i A_i(t) \exp(j2\pi f_i t + j\pi k_i t^2) + c(t), |t| \leq T \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $A_i(t)$ 为第 i 个微动信号分量的幅度,是时间的函数,中心频率和调频率分别为 f_i , k_i , $c(t)$ 为海杂波.

3 海面微动目标检测方法

3.1 海尖峰识别和抑制

由于海尖峰的出现,使得海杂波由稳态向非稳态,非时变向时变转换,体现出微多普勒特性,雷达将海尖峰误判为具有一定速度的运动目标,进而导致虚警概率的增加.因此,研究海尖峰的识别和抑制方法对于海面目标尤其是微动目标的检测至关重要.首先需要将海尖峰从杂波背景中分离出来,采用 Fred Posner^[10]等人提出的基于三特征参数的海尖峰识别方法,

$$\begin{cases} |x_i^{\text{HH}}|^2 \geq T_s^{\text{HH}} \\ W_s^{\text{HH}} \geq W_{\text{min}}^{\text{HH}} \\ I_s^{\text{HH}} \geq I_{\text{min}}^{\text{HH}} \end{cases} \quad (18)$$

式中, x_i^{HH} 为 HH 极化方式下雷达回波的第 i 个采样点, W_s^{HH} 和 I_s^{HH} 分别表示尖峰宽度(尖峰持续时间)和尖峰间隔.尖峰幅度门限 T_s^{HH} 可取为海杂波平均功率的 L 倍,

$$T_s^{\text{HH}} = \frac{L}{N} \sum_{i=1}^N |c_i^{\text{HH}}|^2 \quad (19)$$

式中, N 为序列长度.该识别方法同样适用于 VV 极化.

根据式(18)的判定准则从海杂波序列中提取出海尖峰,则海杂波序列被分为无海尖峰的海杂波背景和海尖峰序列.将海尖峰序列置零,仅保留不含海尖峰的海杂波背景序列,分别计算各个海杂波背景序列的平均功率水平,假设海杂波序列被分为 $2n$ 个数据段,其中第 1,3,5, ..., $2n-1$ 段为海尖峰序列,而其余的第 2,4,6, ..., $2n$ 段为海杂波背景序列,选取最小平均功率对应的海杂波背景序列作为待检测数据,计算方法如下

$$i_0 = \operatorname{argmin}_i \left(\frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} |x_i(j)|^2 \right), \quad (20)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, M_i$$

式中, x_i 为第 i 个海杂波背景序列, M_i 为序列长度, i_0 为最小平均功率对应的海杂波背景序列序号.此方法可降低海尖峰的比重,进一步改善 SCR,达到抑制海杂波的目的.

3.2 微动信号的 GSTFRFT

通过增加窗函数,STFRFT 能够很好地描述和分析

时变信号,尤其是目标的微动特征,克服了 FRFT 不具有描述信号局部特征的缺点^[8]

$$\text{STFRFT}_\alpha(t, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) g(\tau - t) K_\alpha(\tau, u) d\tau \quad (21)$$

式中 $\alpha, = p\pi/2$ 是旋转角度, p 为变换阶数, $K_p(t, u)$ 表示核函数, $g(t)$ 为窗函数。

本文采用具有最小时宽带宽且较为常用的高斯窗函数 $g(\tau)$

$$g(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2\sigma^2}\right), |\tau| \leq T_n \quad (22)$$

式中, σ 为标准差。根据 FRFT 的乘积性质^[11], 函数 $x(t)$ 和 $y(t)$ 乘积的 FRFT 可分解为以下三步: 首先, 将 $x(t)$ 进行 FRFT 并乘以 chirp 信号; 其次, 与 $y(t)$ 的 FT 做卷积运算; 最后, 再次乘以 chirp 信号并进行幅度调整。因此, 微多普勒信号 $s(t)$ 的 GSTFRFT 表示为

$$\text{GSTFRFT}_{\alpha_i}(u) = \frac{|\csc\alpha_i|}{\sqrt{2\pi}} e^{j\frac{u^2}{2}\cot\alpha_i} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} S_{\alpha_i}(\tau) G_{\pi/2}[(u - \tau)\csc\alpha_i] e^{-j\frac{\tau^2}{2}\cot\alpha_i} d\tau \quad (23)$$

式中, S_{α_i} 为 $s(t)$ 的 FRFT, $G_{\pi/2}$ 表示高斯窗函数 $g(\tau)$ 的 FT, 即

$$G_{\pi/2}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \exp(-j u \tau) d\tau = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} u^2 \sigma^2\right) \quad (24)$$

$$S_{\alpha_i}(\tau) = A_i(t) A_{\alpha_i} e^{j\frac{\tau^2}{2}\cot\alpha_i} \int_{-T_n}^{T_n} e^{j(2\pi f_i - \tau \csc\alpha_i)u} du \\ = 2A_i(t) A_{\alpha_i} T_n e^{j\frac{\tau^2}{2}\cot\alpha_i} \text{sinc}[(2\pi f_i - \tau \csc\alpha_i) T_n] \quad (25)$$

式中, $A_\alpha = \sqrt{(1 - j\cot\alpha)/2\pi}$ 。则 $s(t)$ 的 GSTFRFT 表达式为

$$\text{GSTFRFT}_{\alpha_i}(t, u) = 2A_i(t) A_{\alpha_i} T_i \frac{|\csc\alpha_i|}{2\pi} e^{j\frac{u^2}{2}\cot\alpha_i} \\ \int_{-T_n}^{T_n} \text{sinc}[(2\pi f_i - \tau \csc\alpha_i) T_n] e^{-\frac{1}{2}(u - \tau)^2 \sigma^2 \csc^2 \alpha_i} d\tau \quad (26)$$

当 $\tau = 2\pi f_i \sin\alpha_i$ 时, 微多普勒信号的 GSTFRFT 模函数达到最大值, 表现为 sinc 函数。

3.3 算法流程

图 2 为本文所提方法的流程图, 具体步骤如下:

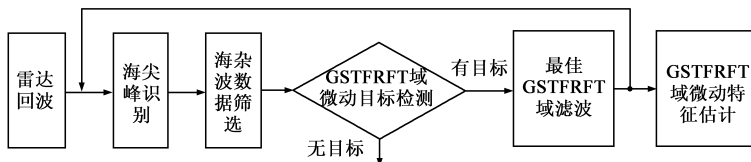


图 2 基于 GSTFRFT 的微动目标检测与特征提取方法流程图

步骤 1 在接收端, 得到经解调和脉压处理后的同一距离单元内的雷达回波数据 $c(i), i = 1, 2, \dots, N$, 并按照式(18)的海尖峰识别方法, 将海杂波数据分为海尖峰序列和不含海尖峰的海杂波背景序列, 分别计算各个海杂波背景序列的平均功率水平, 选取最小平均功率对应的海杂波背景序列 i_0 作为待检测数据, 计算方法如式(20)所示。

步骤 2 对待检测数据进行不同变换阶数下的 GSTFRFT 运算, 采用分级迭代的计算方法进行峰值搜索^[1], 并记录峰值对应的 GSTFRFT 域坐标

$$(p_i, u_i) = \underset{p, u}{\text{argmax}} |\text{GSTFRFT}(p, u)|_{T_i} \quad (27)$$

式中, $T_i = M_i/f_s$ 为待检测数据的时长, f_s 为采样频率。取 GSTFRFT 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, 判决目标的有无

$$|P_i| \underset{H_0}{\geq} \eta \quad (28)$$

式中, P_i 为 GSTFRFT 域的第 i 个峰值, η 为检测门限, 可采用常用的恒虚警 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 检测方法确定门限^[12]。

步骤 3 将最佳 GSTFRFT 域数据通过窄带通滤波器, 滤除除第一微动信号分量 (p_1, u_1) 外的绝大部分信号能量,

$$\text{GSTFRFT}'_{p_1}(t, u) |_{T_i} = \text{GSTFRFT}_{p_1}(t, u) |_{T_i} \cdot H(p_1, u) \quad (29)$$

式中, $H(p_1, u)$ 为窄带通滤波器, 其带宽与峰值宽度有关, 即

$$H(p_1, u) = \begin{cases} 1, & u_1 - W_1 \leq u \leq u_1 + W_1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (30)$$

式中, $W_1 = \frac{2\pi}{T_i \csc(p_1\pi/2)}$ 。

步骤 4 对滤波后的最佳 GSTFRFT 域数据进行逆运算, 提取出第一微动信号分量 $s_1(t)$,

$$s_1(t) = \text{GSTFRFT}'_{-p_1}(t, u) |_{T_i} \quad (31)$$

进而得到调频率的估计值

$$\hat{k}_1 = -\cot(p_1\pi/2)/S^2 \quad (32)$$

式中, $S = \sqrt{T_i/f_s}$ 为量纲归一化的尺度因子。

步骤 5 将滤除第一微动信号的雷达回波继续进行步骤 2 至步骤 4 的运算, 检测并提取其它微动信号分量。

4 实验结果与分析

本节将采用加拿大 McMaster 大学的 X 波段 IPIX 雷达高海况海杂波数据 (19931107_135603)^[13] 进行仿真实验,同时与经典的 STFT 时频分析方法相比较,验证所提方法的有效性.微动目标的仿真参数如表 1 所示,海面舰船目标朝向雷达航行并伴随有匀加速运动和偏航运动,由于偏航运动受海况影响较大,因此两种运动导致的微动信号的 SCR 不同,分别为 -3dB 和 -5dB.

表 1 微动目标仿真参数说明

目标参数	f_1 (Hz)	v_{0i} (m/s)	k_i (Hz/s)	a_i (m/s ²)	SCR (dB)	T (s)
平动分量	80	1.2	40	0.6	-3	1
转动分量	50	0.75	20	0.3	-5	1

采用海尖峰的判别准则对实测海杂波数据进行海尖峰判别,本节在计算过程中采用文献[10]中的统计参数值,即最小尖峰宽度设为 0.1s,最小尖峰间隔设为 0.5s,尖峰幅度门限取为海杂波平均功率的 5 倍.实际应用中,判别海尖峰三个参数并不是固定不变的,其数值往往随着观测条件和海况的变化而有所变化.图 3 (a)给出了 IPIX 数据在 HH 极化方式下的海尖峰判别情况.可以看出,海尖峰较背景杂波起伏剧烈,与目标回波较为相似,容易造成虚警.进一步对海尖峰和海杂波背景的时频特性进行分析,如图 3 (b)和 (c)所示,可知无海尖峰的海杂波背景多普勒能量主要集中在中心

频率附近(约为 30Hz ~ 40Hz),主要体现为大尺度波的 Bragg 散射,而海尖峰的多普勒谱发生明显偏移和展宽,主要体现为“快变信号”的非 Bragg 散射,使得回波散射截面积起伏,多普勒频率随时间变化,表现出明显的非平稳和时变特性.

由于 STFT 谱频率分辨率有限,同时对时变信号能量积累效果差,因此仅在频域不能很好地分析海尖峰特性及其对微动目标回波信号的影响,将雷达回波信号变换至 FRFT 域,得到微动信号的 FRFT 谱,如图 4 所示, p 轴表示变换阶数,对应调频率, u 轴对应频率.由图 4 可知,海尖峰具有时变特性,在 FRFT 域形成多个峰值,对目标的微动信号分量的检测形成不利影响,较弱的转动分量已被海尖峰所遮蔽;而经过海尖峰抑制后,目标回波的 FRFT 谱幅值有所下降,但微动分量峰值明显,并能区分平动和转动分量,表明海尖峰抑制方法的有效性.

图 5 给出了剔除海尖峰并进行数据筛选后,微动信号在 STFT 域和 GSTFRFT 域特征,其中相参积累脉冲数为 256.通过对比可以看出,海杂波的 STFT 谱幅值严重影响了对微动信号尤其是 SCR 和频率均较低的转动分量的检测.通过滑动窗函数, GSTFRFT 谱能够获得更高的时频分辨能力以及更精细的微动特征,有助于区分高海况时的海杂波和微动信号分量.由于 STFT 为加窗的 FT,可认为是不同时间段的多普勒滤波器组运算,因

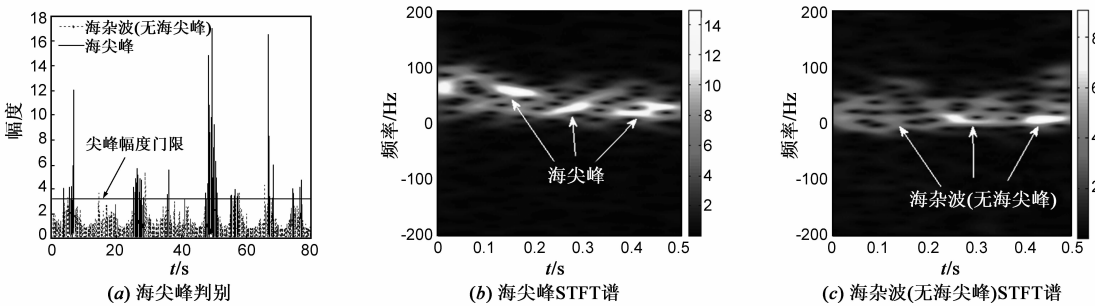


图 3 海杂波背景中的海尖峰判别及时频特性(HH极化)

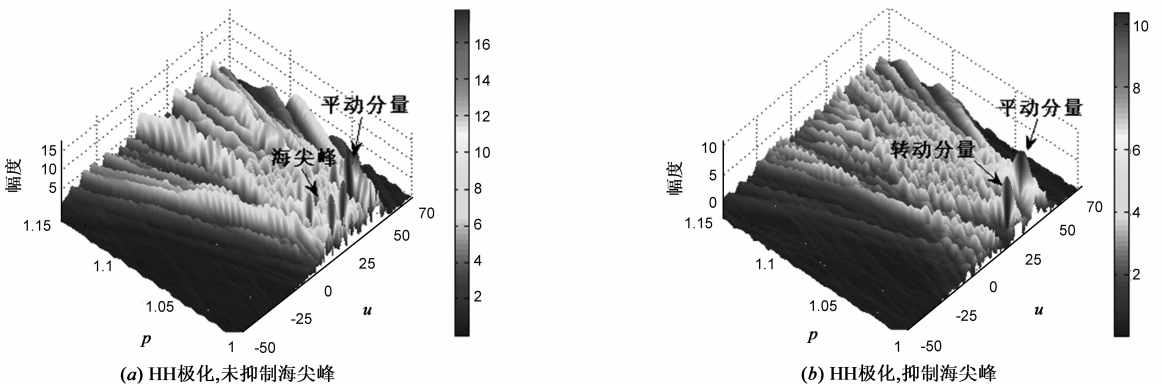


图 4 海尖峰抑制前后微动目标信号FRFT谱(N=512)

此,图5也在一定程度上反映出所提算法优于雷达中常用的动目标检测(Moving Target Detection, MTD)方法。

图6给出了基于STFT和GSTFRFT的微动信号检测结果。可以看出,微动信号分量在STFT域受海杂波影响严重,因此,即使在CFAR检测后仍会保留较多虚警。在匹配的GSTFRFT域,微动信号能量得到最大程度的积累,形成明显峰值,相比STFT峰值,GSTFRFT峰值尖锐,旁瓣较低;同时剔除了一部分海尖峰,在一定程度上改善了SCR,使得微动信号更容易从海杂波背景中检测出来。

为进一步量化说明该方法对SCR的改善效果,将所提方法与双参数CFAR检测器相结合,形成相应的检测方法,并基于IPIX实测数据进行Monte Carlo仿真分析,得到在虚警概率 10^{-3} 、 $SCR = -5\text{dB}$ 、 $N = 512$ 的条件下的检测概率。得益于对海尖峰的抑制以及STFRFT对微动目标能量的有效积累,所提检测方法的发现概率可达80%,相对于STFT检测方法和经典的MTD方法,发现概率可提升30%以上。表2对微动信号参数估计结果进行了比较。可知,由于转动分量在STFT域被海杂波所遮蔽,因此估计误差较大,而本文方法在抑制海杂波的同时最大程度地积累微动信号能量,因此,在低SCR条件下具有较高的参数估计精度。然而,由于GST-

FRFT需要进行参数搜索和FRFT运算,相比STFT方法较为耗时,但仍可通过基于FFT的FRFT离散算法提高运算效率。

表2 微动信号参数估计性能比较 ($N = 256$)

	STFT方法		GSTFRFT方法	
	HH	VV	HH	VV
$\hat{f}_1(\text{Hz})$	71.054	66.412	79.874	81.130
$\hat{k}_1(\text{Hz/s})$	37.862	32.721	39.889	40.600
$\hat{f}_2(\text{Hz})$	42.970	39.064	49.405	48.287
$\hat{k}_2(\text{Hz/s})$	15.547	11.782	21.197	21.454
$\bar{t}(\text{s})$	0.128	0.129	1.081	1.088

5 总结

本文将微多普勒理论引入对海雷达目标检测领域,在建立海面目标微动模型的同时,针对目标的运动状态,采用GSTFRFT分析微动特征,寻找海杂波与微动目标回波信号特性的差异,构造检测统计量,最终实现强海杂波背景下的弱目标微动特征检测。采用IPIX雷达实测数据进行仿真分析,表明所提方法的检测性能优于经典的MTD方法。

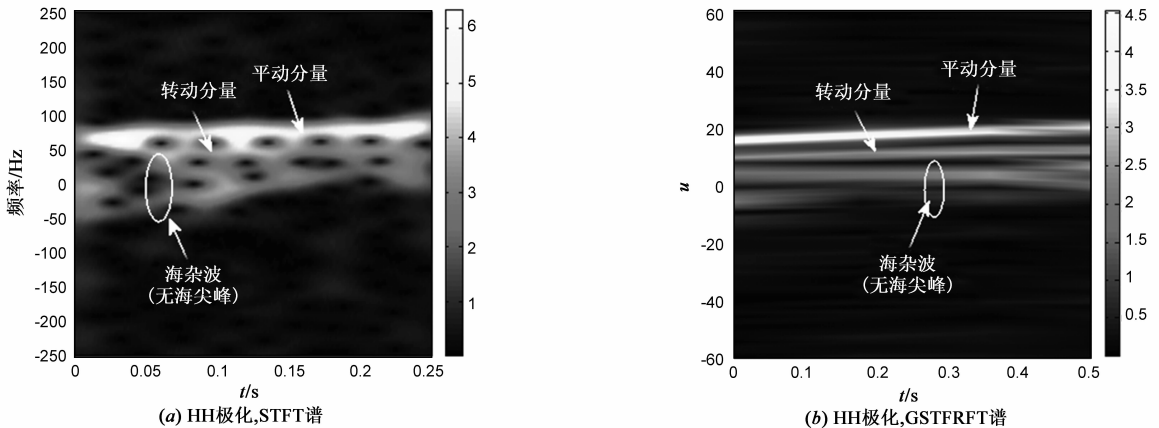


图5 海杂波抑制后的微动信号变换域特征($N=256$)

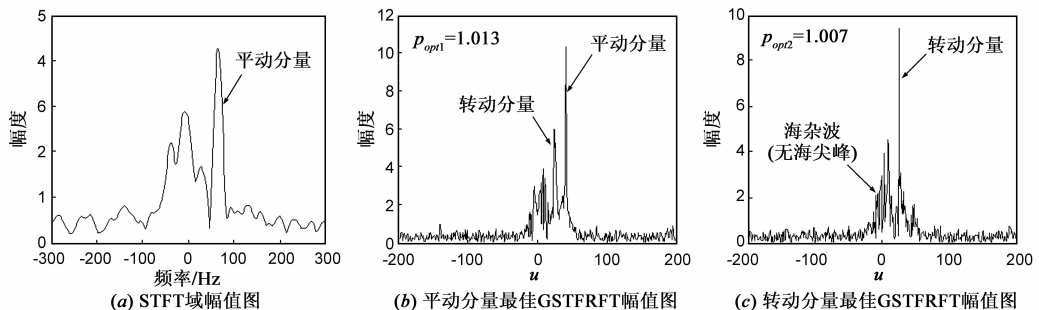


图6 海杂波抑制后基于STFT和GSTFRFT的微动信号检测结果比较($N=512$)

参考文献

- [1] Chen Xiaolong, Guan Jian, et al. Detection of low observable moving target in sea clutter via fractal characteristics in fractional Fourier transform domain[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2013, 7(6): 635 – 651.
- [2] 陈小龙, 黄勇, 等. 改进的一维时变海面模型及其分数阶功率谱研究[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(8): 1897 – 1904.
Chen Xiaolong, Huang Yong, et al. Study on the fractional power spectrum of the improved 1-D time-varying sea surface model[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2012, 34(8): 1897 – 1904. (in Chinese)
- [3] Y Li, R Wu, et al. Inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2008, 2(6): 395 – 403.
- [4] 庄钊文, 刘永祥, 等. 目标微动特性研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 520 – 525.
Zhuang Zhaowen, Liu Yongxiang, et al. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 520 – 525. (in Chinese)
- [5] Victor C. Chen, Fayin Li, Shen-shyang Ho, Harry Wechsler. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 2006, 42(1): 2 – 21.
- [6] 陈小龙, 关键, 等. 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, et al. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 123 – 134. (in Chinese)
- [7] 刘阳, 王雪松. 微动特性干扰对基于 FrFT 的多孔径 SAR/GMTI 的效果分析[J]. 电子学报, 2011, 39(9): 2039 – 2045.
Liu Yang, Wang XueSong. The analysis of the effect for a micro-motion jamming to multi-aperture SAR/GMTI base on fractional Fourier transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(9): 2039 – 2045. (in Chinese)
- [8] Tao Ran, Li Yanlei, et al. Short-time fractional Fourier transform and its applications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5): 2568 – 2580.
- [9] Xu Jia, Yu Ji, et al. Radon – Fourier transform for radar target detection, I: generalized Doppler filter bank[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 1186 – 1202.
- [10] Fred L Posner. Spiky sea clutter at high range resolutions and very low grazing angles[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems, 2002, 38(1): 58 – 73.

- [11] Ahmed I. Zayed. A convolution and product theorem for the fractional Fourier transform[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1998, 5(4): 101 – 103.
- [12] 郝程鹏, 侯朝焕. 一种 K – 分布杂波背景下的双参数恒虚警检测器[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 756 – 759.
Hao Chengpeng, Hou Chaohuan. Atwo parameter CFAR detector in K-distribution Clutter[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2007, 29(3): 756 – 759. (in Chinese)
- [13] A Farina, F Gini, M V Greco, et al. High resolution sea clutter data statistical analysis of recorded live data[J]. IEE Proc-Radar, Sonar and Navig, 1997, 144(3): 121 – 130.

作者简介



陈小龙 男, 1985 年生于山东烟台. 海军航空工程学院博士生. 硕士论文获全军优秀学术论文奖. 研究方向包括微多普勒分析, 时频信号分析和海杂波中微弱目标检测.
E-mail: cxlexl1209@163.com



刘宁波 男, 1983 年生于山东烟台. 海军航空工程学院信息融合研究所讲师, 博士. 研究方向包括分形信号处理, 海杂波中微弱目标检测.



王国庆 男, 1980 年生于山东安丘. 海军航空工程学院信息融合研究所讲师. 博士. 研究方向包括雷达信号处理.



关键 男, 1968 年生于辽宁锦州. 海军航空工程学院电子信息工程系教授, 博士生导师, 获全郭优秀博士学位论文奖, 新世纪百千万人才工程国家级人选, “泰山学者”特聘教授. 研究方向包括雷达目标检测与跟踪, 侦察图像处理和信息融合.
E-mail: guanjian96@tsinghua.org.cn