

稀疏域海杂波抑制与微动目标检测方法

陈小龙¹, 关 键¹, 董云龙², 赵志坚³

(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;

3. 海军航空工程学院接改装训练大队, 山东烟台 264001)

摘 要: 针对海上微动目标回波信号具有稀疏性的特点, 该文研究了稀疏域微动特征提取和检测方法, 提出一种基于形态成分分析(MCA)的海杂波抑制与微动目标检测方法. 该方法充分利用海杂波和微多普勒信号组成成分的形态差异性, 对不同源信号采用不同的字典进行稀疏表示, 区分海杂波与微动目标. 此外, 提出的稀疏域海杂波抑制方法, 能够在抑制海杂波的同时积累更多的信号能量, 改善信杂比. 仿真和实测数据验证了算法的正确性.

关键词: 雷达目标检测; 海杂波; 微多普勒; 稀疏表示; 形态成分分析

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2016)04-0860-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.04.015

Sea Clutter Suppression and Micromotion Target Detection in Sparse Domain

CHEN Xiao-long¹, GUAN Jian¹, DONG Yun-long², ZHAO Zhi-jian³

(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;

3. Training Brigade of the Received and Reformed Equipment, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, Shandong 264001, China)

Abstract: Using the sparse property of the signal from a marine micromotion target, the extraction and detection of micromotion signatures in sparse domain are studied. An algorithm for sea clutter suppression and micromotion target detection is proposed based on the morphological component analysis (MCA). The algorithm takes full advantage of the morphological differences between sea clutter and micro-Doppler signal, and can separate them via sparse representation of different source signals using different dictionaries. Moreover, the proposed sea clutter suppression method in sparse domain can achieve both target's energy accumulation and sea clutter suppression with improved signal-to-clutter ratio (SCR). Simulated and real data all verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: radar target detection; sea clutter; micro-Doppler; sparse representation; morphological component analysis (MCA)

1 引言

海杂波中微弱目标尤其是“低、慢、小”目标的检测技术始终是雷达信号处理领域的难题^[1], 不仅具有理论重要性, 而且广泛应用于军用和民用领域. 海杂波中微弱目标的共同点是, 由于雷达分辨低、距离远、背景强等因素, 无论是在时域还是在频域, 目标分辨单元中的信杂(噪)比(Signal-to-Clutter/Noise Ratio, SCR/SNR)都很低, 海杂波会淹没目标信号, 严重降低检测性能^[2]. 经典的基于统计理论和混沌、分形的目标检测方法^[3], 由于受到模型匹配、SCR、算法复杂度和通用性的制约, 难以满足雷达高检测概率, 高稳定性和可靠性的要求.

通常, 海上目标的运动形式表现为匀速运动、匀加速运动和变加速运动等, 然而, 在实际中, 目标的运动状态复杂多样. 一方面, 在高海况条件下, 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(滚动、俯仰和偏航), 导致回波多普勒频率随时间非线性变化^[2]. 近年来, 微多普勒(Micro-Doppler, M-D)理论^[4]为非平稳信号的分析 and 处理提供了新的思路, 可用于目标检测、成像和识别等^[5,6]. 研究表明, 微多普勒适合分析海杂波以及海上目标回波信号, 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对海上微弱目标的检测能力^[2,7,8].

收稿日期: 2014-08-04; 修回日期: 2015-01-23; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61501487, No. 61471382, No. 61401495, No. 61201445, No. 61179017); 山东省自然科学基金(No. 2015ZRA06052); 飞行器海上测量与控制联合实验室开放基金

信号时频处理方法,如短时 Fourier 变换(Short Time Fourier Transform,STFT)、经验模式分解(Empirical Mode Decomposition,EMD)、分数阶 Fourier 变换(Fractional Fourier Transform,FRFT)等,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^[8].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,如果基函数与信号的特性相匹配,就可以选择用较少的基函数来表示原信号,即信号的稀疏表示.目前,国内外少有报道信号稀疏表示方法在目标微动特征分析及提取方面的应用^[9,10],但作为一种新兴的信号处理方法,又具有很大的优势,表现在频率超分辨,无交叉项,抗噪性好,运算效率高等,从而更有利于获得目标精细特征.海上微动目标回波信号不仅包含时变的微多普勒信号,而且存在不同于噪声背景的海杂波,使得微动信号和海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,即稀疏成分分析(Sparse Component Analysis,SCA)^[10],往往难以区分海杂波和微动信号.

近几年提出的另一种基于信号稀疏表示的信号分解方法,形态成分分析(Morphological Component Analysis,MCA)方法^[11,12]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,相比SCA方法更适合分析混合信号.由于海杂波和微多普勒信号形式及特性有所不同,本文将MCA方法用于海上目标检测,通过分别构建海杂波与微动目标回波信号的稀疏表示字典,使两个字典仅能稀疏表示相对应的信号,而对于其它信号不能稀疏表示,具有区分海杂波与微动目标的能力,并在稀疏域设计海杂波抑制方法,进一步改善SCR,实验结果证明了方法的有效性.

2 海面微动目标观测模型

采用向量形式分析海上刚体目标微动模型,如图1所示,其中雷达位于原点 O ,坐标系包括目标固定参考坐标系 $C_{ref}=(X,Y,Z)$ 、目标运动坐标系 $C_{mov}=(x,y,z)$ 以及雷达与目标视线(Radar Line-of-Sight,RLOS)坐标系 $C_{rlos}=(q,r,h)$.在 $t=t_0$ 时刻,海上微动目标质心位于 O_1 点,点散射体 D_1 在 $t=t_1$ 时运动到 D_3 点,目标质心运动到 O_2 点.若雷达发射线性调频(Linear Frequency Modulated,LFM)信号,则经过解调和脉压后,目标回波为快时间(脉内时间 t)和慢时间(脉间时间 t_m)的函数,表示为^[2]

$$s_{pc}(t,t_m) = A_r \operatorname{sinc}\left[B\left(t - \frac{2R_s(t_m)}{c}\right)\right] \exp\left(-j \frac{4\pi R_s(t_m)}{\lambda}\right) \quad (1)$$

式中, A_r 是回波幅度, B 为带宽, $R_s(t_m)$ 为RLOS距离, c 代表光速, $\lambda=c/f_c$ 为雷达波长, f_c 是雷达载频.根据图1的几何关系,则RLOS距离 OD_3 可分解为初始距离 r_0 ,

以速度 \mathbf{v} 从 D_1 平动到 D_2 ,然后以角速度 $\boldsymbol{\omega}=(\omega_x,\omega_y,\omega_z)$ 转动到 D_3 ,

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_s(t_m) &= OD_3 = OD_1 + D_1D_2 + D_2D_3 \\ &= \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}t_m + \mathbf{R}_t\mathbf{R}_0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中,从 D_2 转动到 D_3 可用旋转矩阵 \mathbf{R}_t 描述, $\mathbf{R}_0=(x_0,y_0,z_0)^T$ 为目标运动坐标系中任意散射点的位置.

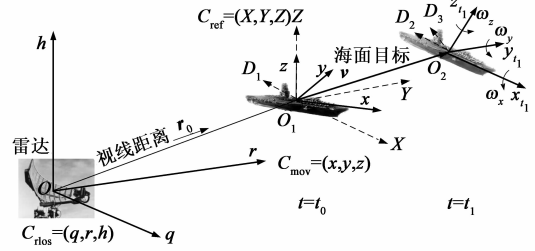


图1 雷达和海上微动目标观测模型

仅考虑径向速度分量,由式(2)可得到海上目标的微多普勒频率

$$\begin{aligned} f_{m-D}(t_m) &= \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{d}{dt_m} \mathbf{R}_s(t_m) \\ &= \frac{2}{\lambda} \cdot \left[\mathbf{v} + \frac{d}{dt_m} (\mathbf{R}_t \mathbf{R}_0) \right]^T \cdot \mathbf{n} \\ &= f_t(t_m) + f_r(t_m) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, \mathbf{n} 表示单位矢量.

式(3)表明,目标的微多普勒频率由非匀速平动和三轴转动引起, $f_t(t_m)$ 和 $f_r(t_m)$,其幅度和频率受海况和目标运动状态影响.对于以非匀速平动为主要运动方式的海上目标,如低空掠海飞行目标、快艇等,可用LFM信号作为调频信号的一阶近似文献[7,13];而对于以转动为主要运动方式的海上目标,如高海况海面起伏目标等,其回波具有周期调频性,可根据观测和积累时间的长短,采用LFM或二次调频(Quadratic Frequency Modulated,QFM)信号进行近似.

$$f_t(t_m) = \frac{2}{\lambda} \cdot (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) \approx f_0 + \mu t_m \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f_r(t_m) &= \frac{2}{\lambda} (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_t \mathbf{R}_0) \cdot \mathbf{n} \\ &\approx \frac{2}{\lambda} \left[\begin{aligned} &\boldsymbol{\omega}_0 \cdot (\mathbf{R}_t \mathbf{R}_0 \times \mathbf{n}) + \boldsymbol{\omega}_1 \cdot (\mathbf{R}_t \mathbf{R}_0 \times \mathbf{n}) t_m \\ &+ \boldsymbol{\omega}_2 \cdot (\mathbf{R}_t \mathbf{R}_0 \times \mathbf{n}) \frac{t_m^2}{2} \end{aligned} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $f_0=2v_0/\lambda$, $\mu=2a_s/\lambda$ 为加速度 a_s 引起的调频率, $\boldsymbol{\omega}_0$ 、 $\boldsymbol{\omega}_1$ 和 $\boldsymbol{\omega}_2$ 为 $\boldsymbol{\omega}$ 的泰勒级数展开结果.则RLOS距离为

$$\mathbf{R}_s(t_m) = \int_0^{T_n} [(\mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_t \mathbf{R}_0) \cdot \mathbf{n}] dt_m \quad (6)$$

式中, T_n 为积累时间.

3 微多普勒信号的形态成分分析

对于集合 $\mathbf{g}=\{g_i; i=1,2,\dots,K\}$,其元素是张成整

个 Hilbert 空间 $\mathbf{H} = \mathbf{R}^N$ 的单位矢量, 并且 $K \geq N$, 称集合 \mathbf{g} 为原子库(字典), 集合中的元素为原子. 对于任意信号 $\mathbf{f} \in \mathbf{H}$ 可以展开为一组原子的线性组合, 即对信号 \mathbf{f} 做逼近

$$\mathbf{f} = \sum_m \alpha_m \mathbf{g}_m \quad (7)$$

式中, m 为原子个数, 系数 α_m 的大小表示信号与原子的相似程度.

在无噪声背景下求解式(7)的信号稀疏表示问题可描述为凸优化问题

$$\min \|\boldsymbol{\alpha}\|_1, \quad \text{s. t. } \mathbf{f} = \mathbf{g}\boldsymbol{\alpha} \quad (8)$$

其中 \mathbf{g} 需满足有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)^[14].

MCA 根据多分量信号自身的信号结构和特点, 利用信号组成成分的形态差异性, 分别在各自对应的原子上进行稀疏分解, 然后利用追踪(Matching Pursuit, MP)算法^[15]搜索最稀疏的表示, 达到区分混合信号的目的. 假设信号 \mathbf{f} 包括 K 个分量, 即 $\mathbf{f} = \sum_i \mathbf{f}_i$, 其中每个分量信号形式均不相同, 则^[11,12]

(1) 对于任意信号分量 \mathbf{f}_k , 存在过完备字典 $\mathbf{g}_k (N \times L_k$ 维, $L_k \gg N)$, 使得

$$\boldsymbol{\alpha}_k^{\text{opt}} = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \|\boldsymbol{\alpha}\|_1, \quad \text{s. t. } \mathbf{f}_k = \mathbf{g}_k \boldsymbol{\alpha} \quad (9)$$

存在稀疏解 ($\|\boldsymbol{\alpha}_k^{\text{opt}}\|_0$ 非常小), 即 \mathbf{g}_k 能够稀疏表示 \mathbf{f}_k .

(2) 对于任意信号分量 $\mathbf{f}_l, k \neq l$, 求解

$$\boldsymbol{\alpha}_l^{\text{opt}} = \arg \min_{\boldsymbol{\alpha}} \|\boldsymbol{\alpha}\|_1, \quad \text{s. t. } \mathbf{f}_l = \mathbf{g}_k \boldsymbol{\alpha} \quad (10)$$

得到的解非常不稀疏, 不是最优的, 因此, \mathbf{f}_l 在过完备字典 \mathbf{g}_k 中不能被稀疏表示.

由式(9)和(10), 可知, 通过 MCA 可使得信号仅能在各自的稀疏字典上进行稀疏分解, 而不能稀疏表示其它信号分量, 即稀疏字典和信号存在一一对应的关系. 对于海上微动目标信号的分析, 其回波恰恰是目标和海杂波的混合, 各自的信号形式和特点不尽相同. 因此, 可利用 MCA 得到微动目标的稀疏表示, 从而最大程度地提高微动信号能量聚集性. 将海上微动目标回波信号表示为目标 \mathbf{s}_k 和海杂波 \mathbf{c} 的混合, 即

$$\mathbf{x} = \sum_k \mathbf{s}_k + \mathbf{c} \quad (11)$$

则 MCA 的目标函数为

$$\begin{aligned} & \{\boldsymbol{\alpha}_1^{\text{opt}}, \boldsymbol{\alpha}_2^{\text{opt}}, \dots, \boldsymbol{\alpha}_k^{\text{opt}}\} \\ & = \arg \min_{(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)} \sum_k \|\boldsymbol{\alpha}_k\|_1 + \lambda \left\| \mathbf{x} - \sum_k \mathbf{g}_k \boldsymbol{\alpha}_k \right\|_2^2 \end{aligned} \quad (12)$$

式中, \mathbf{g}_k 为信号 \mathbf{s}_k 的稀疏字典, λ 可以调整残差的大小.

为了得到式(12)的最优解, 文献[16]提出了迭代门限算法(Block Coordinate Relaxation, BCR)法进行求解, 即 MCA 的数值实现.

4 稀疏域海杂波抑制与微动目标检测方法

4.1 稀疏域海杂波抑制方法

通常海面波浪可分为大尺度重力波和小尺度张力波, 重力波可用多分量单频信号表示, 张力波可近似建模为高斯信号. 重力波在海杂波中占主导地位, 即使是在高海况的条件下, 其能量比重仍然很大, 因此, 在一定程度上海杂波的稀疏字典可近似为 FT 字典. 通过对微动目标回波中的海杂波进行 MCA, 得到其稀疏表示, 进而海杂波的稀疏域设计抑制方法, 从而有利于提高微动信号的能量聚集性, 改善 SCR.

首先, 将同一距离单元内的雷达回波进行预处理, 得到 N 个采样点的输入信号序列 $x(i), i = 1, 2, \dots, N$. 将输入信号序列 $x(i)$ 分为 I 个时间段, 每个时间段包括 $k = \text{int}(N/I)$ 个采样 ($\text{int}(\cdot)$ 表示取整运算, $k > 2^5$), $\mathbf{x} = \{x_j^{(n)} | n = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, k\}$.

其次, 计算由 FT 构造的海杂波稀疏字典, 设定搜索精度和范围, 假设频率 f_u 的搜索范围为 $f_u \in [0, F]$, 字典中原子个数为 U , 多普勒分辨率为 $\Delta f_u = F/U$, 则构造的 FT 字典为 $U \times I$ 的矩阵

$$\mathbf{G}_c = [\mathbf{g}_c^{(1)}(f), \mathbf{g}_c^{(2)}(f), \dots, \mathbf{g}_c^{(I)}(f)] \quad (13)$$

式中, $\mathbf{g}_c^{(n)}(f)$ 对应第 n 个时间段的字典, $\mathbf{g}_c^{(n)}(f) = [\mathbf{g}_c^{(n)}(f_1), \mathbf{g}_c^{(n)}(f_2), \dots, \mathbf{g}_c^{(n)}(f_U)]^T, n = 1, 2, \dots, I$, $\mathbf{g}_c^{(n)}(f_u)$ 为 FT 原子,

$$\mathbf{g}_c^{(n)}(f_u) = \exp(-j2\pi f_u t); u = 1, 2, \dots, U \quad (14)$$

根据构造的 FT 字典进行稀疏分解, 即计算信号在 FT 字典下的分解系数

$$\alpha_{u,n} = \sum_j \langle x_j^{(n)}, \mathbf{g}_c^{(n)}(f_u) \rangle \quad (15)$$

而微动目标回波信号具有 LFM 或高阶信号特征, 因此不能得到最稀疏的表示结果.

将不同时间段的海杂波稀疏分解系数形成二维稀疏解分布图

$$\mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \dots & \alpha_{1,I} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \dots & \alpha_{2,I} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{U,1} & \alpha_{U,2} & \dots & \alpha_{U,I} \end{bmatrix} \quad (16)$$

并与海杂波稀疏域自适应阈值相比较, 如果输出结果低于阈值, 则直接进行后续的微动目标信号的稀疏表示, 此时存在两种情况: 一种是该距离单元为海杂波单元, 且海杂波较弱; 另一种是该距离单元为目标单元但其回波信号和海杂波均很微弱, 如远距离观测情况. 若输出结果高于阈值, 则保留高于阈值的信号幅值. 工程常用的阈值的计算方法为

$$Y = \frac{1}{QUI} \sum_{q=1}^Q \sum_{n=1}^I \sum_{u=1}^U F_{c_q} \quad (17)$$

式中, F_c 为第 q 个海杂波单元 ($q = 1, 2, \dots, Q$, Q 为单元个数) 的二维稀疏解能量分布。

最后, 在处理后的海杂波二维稀疏解分布图中进行峰值搜索, 峰值坐标对应海杂波在 FT 字典中匹配的原子。此时, 可用少量的 FT 原子表示海杂波的主要成分, 获得海杂波的稀疏表示。将雷达回波信号与海杂波

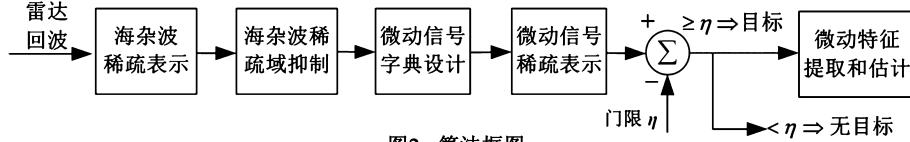


图2 算法框图

步骤一和步骤二按照 4.1 节给出的海杂波稀疏域抑制方法进行, 若信号幅值低于自适应阈值, 直接对预处理后的雷达回波信号进行步骤三的运算。

步骤三、微动目标回波信号稀疏表示

海杂波稀疏域抑制后的微动目标回波信号可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \{x'(i) | i = 1, 2, \dots, N\} \\ &= \{x'_1, \dots, x'_k, x'_1, \dots, x'_k, x'_1, \dots, x'_k\} \end{aligned} \quad (19)$$

根据微动目标回波信号形式计算由 chirp 基构造的过完备字典, 首先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 $\Delta f_l = F'/L$, 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 $\Delta \mu_m = K/M$, 则构造的过完备 chirp 字典为 $L \times M$ 的矩阵

$$\mathbf{G}_s = \begin{bmatrix} g_s(f_1, \mu_1) & g_s(f_1, \mu_2) & \dots & g_s(f_1, \mu_M) \\ g_s(f_2, \mu_1) & g_s(f_2, \mu_2) & \dots & g_s(f_2, \mu_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_s(f_L, \mu_1) & g_s(f_L, \mu_2) & \dots & g_s(f_L, \mu_M) \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, $g_s(f_l, \mu_m) = \exp(j2\pi f_l t + j\pi \mu_m t^2)$, $l = 1, 2, \dots, L$; $m = 1, 2, \dots, M$ 。

然后, 对回波信号式 (19) 进行 MCA, 计算信号在 chirp 原子下的分解系数

$$\beta_{l,m} = \sum_i \langle x'(i), g_s(f_l, \mu_m) \rangle \quad (21)$$

由于 chirp 字典中的原子与微动目标信号的特征相匹配, 可以选择用较少的原子来表示微动目标信号, 即信号分解的结果是稀疏的; 而海杂波具有单频信号的特征, 因此不能在 chirp 基上得到很好地聚集, 从而可进一步改善 SCR。

步骤四、微动目标信号稀疏域检测

将微动目标回波信号稀疏分解结果形成二维稀疏解分布图,

的稀疏表示相消, 达到抑制海杂波的目的, 即

$$x'_j = x_j - c'_j \quad (18)$$

式中, c'_j 为海杂波的稀疏表示。

4.2 微动目标检测方法

基于 MCA 的海杂波抑制和海面微动目标检测算法流程图如图 2 所示, 共包括如下五个步骤。

$$\mathbf{F}_s = \begin{bmatrix} \beta_{1,1} & \beta_{1,2} & \dots & \beta_{1,M} \\ \beta_{2,1} & \beta_{2,2} & \dots & \beta_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{L,1} & \beta_{L,2} & \dots & \beta_{L,M} \end{bmatrix} \quad (22)$$

取信号的幅值作为检测统计量, 与恒虚警 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 检测门限^[17]进行比较, 如果检测统计量高于门限值, 判决为存在微动目标信号, 否则判决为没有微动目标信号, 继续处理后续的检测单元, 进行步骤一至步骤四的运算。

步骤五、微动特征参数估计

微动目标检测后的二维稀疏解分布图中的峰值坐标对应微动目标信号在 chirp 字典中匹配的原子, 设峰值坐标为 (i, j) , 对应匹配原子为 $g_s(f_i, \mu_j)$, 则中心频率估计为 f_i , 调频率估计为 μ_j , 将峰值坐标对应的频率和调频率作为微动特征的特征值。

由于海上目标运动状态不同, 其微动特征也不尽相同, 因此, 微动信号稀疏表示的字典可根据实际情况, 如待观测目标类型和海况高低等先验信息, 按照第 2 节建立的微动目标回波模型, 设计合适的字典和参数, 如 chirp 字典或 QFM 字典, 使算法能够适用于不同类型微动目标检测。

5 实验结果与分析

5.1 仿真数据分析

本节采用 1993 年加拿大 McMaster 大学 X 波段 IP-IX (Intelligent PIXel) 雷达海杂波数据 (19931107_135603, IP-IX-17#) 验证所提算法。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俯仰运动, 由于俯仰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 -2 dB 和 -4 dB, 雷达观测时长为 0.512s。

采用 FT 字典对海杂波进行稀疏分解, 如图 3 所示。可以看出 FT 稀疏域中, 海杂波有能量聚集, 形成较大峰值, 多普勒频率集中在 40Hz ~ 60Hz, 能够采用较少

的 FT 原子表示海杂波信号,因此 FT 字典为海杂波的稀疏字典.

表 1 海上微动目标仿真参数

参数	f_i (Hz)	v_{0i} (kont)	μ_i (Hz/s)	a_i (m/s ²)	SCR (dB)
加速运动分量	145	4.23	80	1.2	-2
转动分量	50	1.46	30	0.45	-4

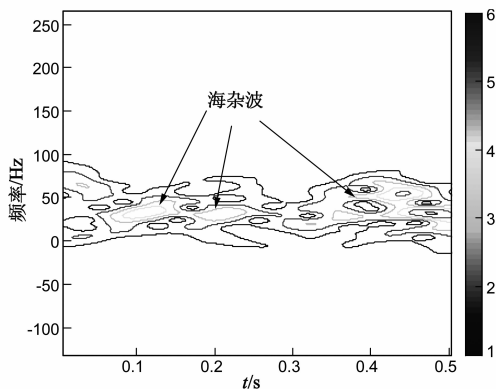
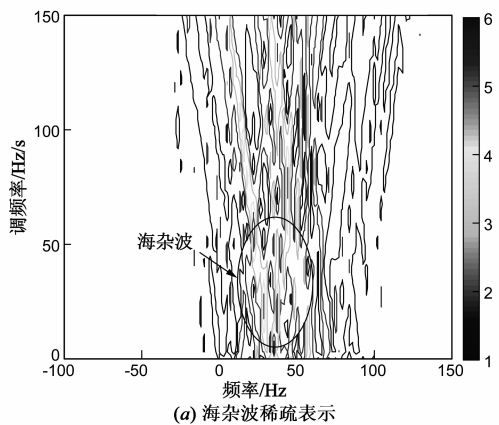
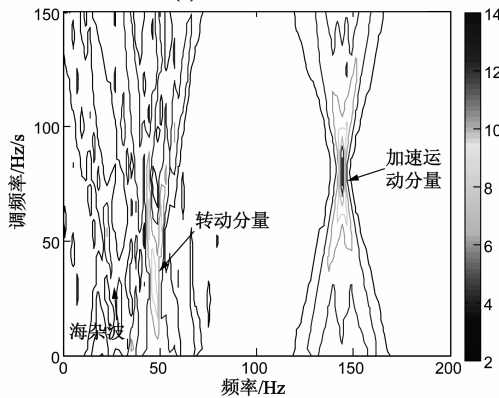


图3 海杂波的FT字典稀疏表示

图 4 进一步给出了雷达回波在 chirp 字典中的稀疏分解结果,其中图 4(a)为纯海杂波单元,图 4(b)为微动目标单元.可以看出,海杂波在 chirp 稀疏域中能量分布较为分散,没有明显的能量聚集点,而微动目标回



(a) 海杂波稀疏表示

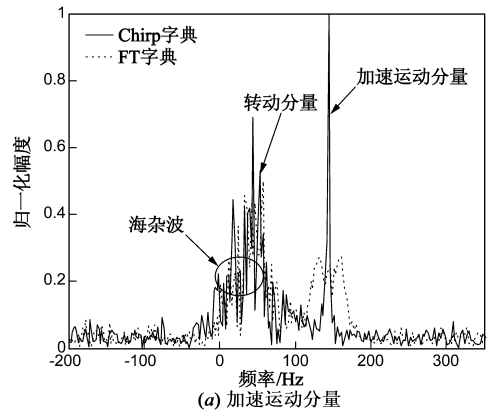


(b) 微动目标回波稀疏表示

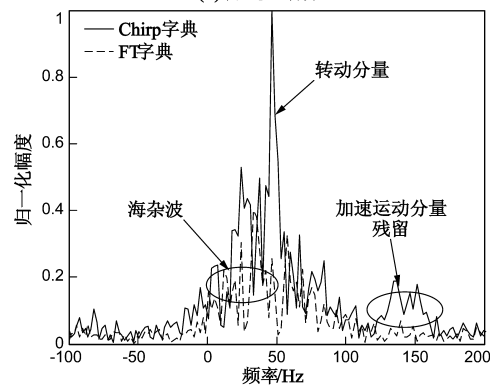
图4 雷达回波的chirp字典稀疏表示

波表现为 LFM 信号,通过 chirp 字典的稀疏分解,得到频率和调频率的能量分布图,可以看出微动信号在匹配的 chirp 字典下形成明显峰值,能够区分出两种运动形式,即匀加速运动和俯仰运动.因此, chirp 字典是微动信号的稀疏字典,而海杂波在 chirp 字典的稀疏域中不能很好地稀疏表示.

图 5 给出了两种微动形式的 MCA 结果,可以看出,通过形态成分分析,使得不同的微动回波信号仅能通过各自匹配的 chirp 字典稀疏表示,而在其它的稀疏域中,由于字典不匹配,能量得不到很好的积累.相比采用 FT 字典分解结果,目标峰值更加明显.图 5 也反映出, MCA 能够成功提取出两种微动特征,但海杂波较强时,在微动目标的稀疏域海杂波仍有部分能量剩余,信号中的微多普勒分量的某些部分可能会被海杂波淹没,导致虚警增多.因此,仍有必要进一步抑制海杂波.



(a) 加速运动分量

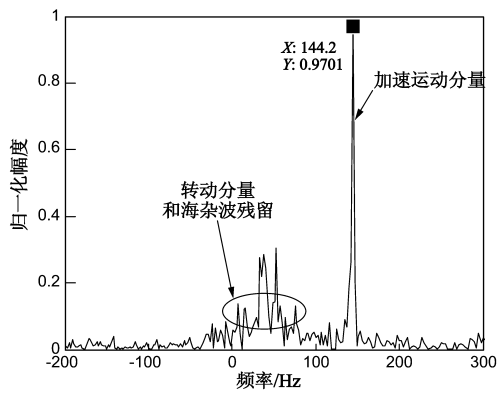


(b) 转动分量

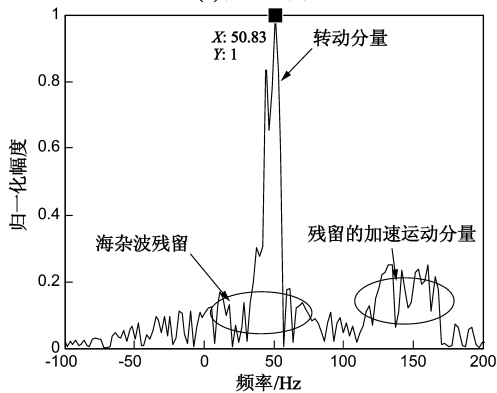
图5 两个微动信号在各自稀疏域的MCA

按照稀疏域海杂波抑制方法,对微动回波信号进行海杂波抑制,得到图 6 的结果.可以看出,大部分海杂波得到了抑制,相比图 5 微动目标峰值清晰可见,能够正确区分海杂波和微动目标,提升 SCR.

将稀疏域海杂波抑制后的回波数据进行 chirp 字典稀疏分解,然后进行 CFAR 检测 ($P_{fa} = 10^{-3}$),提取微动信号分量,如图 7 所示.两个明显峰值表明在微动信号的稀疏域,能够采用很少的原子表示微动信号,峰值

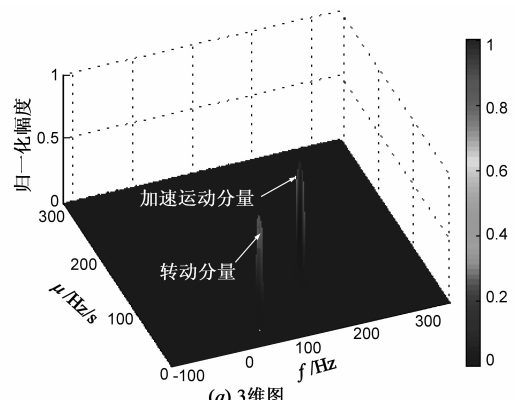


(a) 加速运动分量

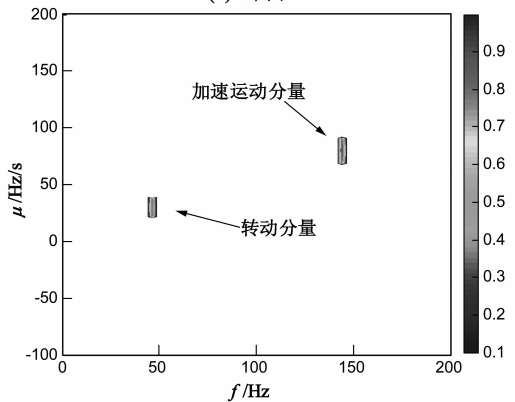


(b) 转动分量

图6 稀疏域海杂波抑制后的微动信号分量



(a) 3维图



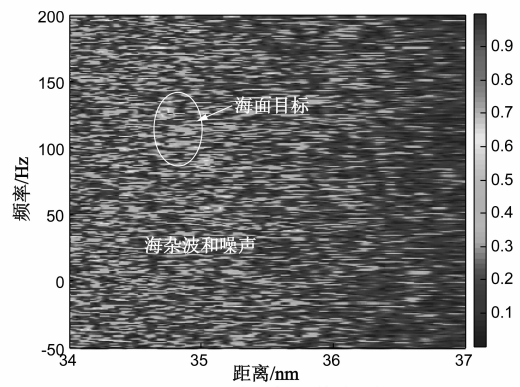
(b) 投影图

图7 提取的微动信号分量

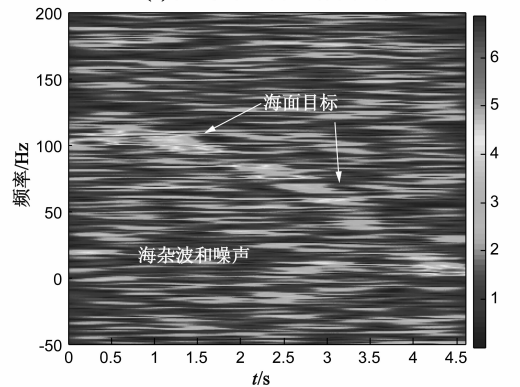
位置可用于估计微动参数. 转动分量参数估计结果为 $f_1 = 50.83\text{Hz}$, $\mu_1 = 30.07\text{Hz/s}$; 加速运动分量参数为 $f_2 = 144.20\text{Hz}$, $\mu_2 = 79.81\text{Hz/s}$. 从仿真结果可以看出, 在有海杂波的情况下, 所提方法仍具有比较好的估计精度.

5.2 实测数据分析

采用某 S 波段对海雷达 (SSR) 开展微动目标探测实验, 观测并采集不同天气和海况条件下的国内外航线客船以及货船回波数据. 雷达采集中频相参数数据, 经过混频和脉压处理后, 在终端显示出目标的方位和距离. 采用 2012 年数据验证算法在高海况时对海面转动目标 (货船) 的积累和检测性能, 如图 8 和图 9 所示. 海况等级约为 3 ~ 4 级, 由图 8(a) 的雷达回波距离-多普勒分析可知, 在 35nm 附近存在一微弱的海面目标, 其多普勒谱严重展宽, 并且目标回波被海杂波和噪声所遮蔽. 高海况条件下, 目标随海面起伏, 转动产生的微多普勒分量较为明显. 图 8(b) 为目标回波的时频分析, 此时可明显看出目标的多普勒具有时变特性, 且符合 QFM 信号模型. 进一步采用不同稀疏字典进行 MCA, 并在稀疏域进行海杂波抑制, 得到图 9 的 CFAR 检测结果 ($P_{fa} = 10^{-4}$). 通过比较可知, 采用 FT 和 chirp 字典的 MCA 结果中, 海杂波和噪声仍然影响微动信号的检测, 这是因为所采用的稀疏字典并不能完全稀疏表示海面



(a) 雷达回波距离-多普勒分析



(b) 目标回波时频分析

图8 雷达回波数据分析

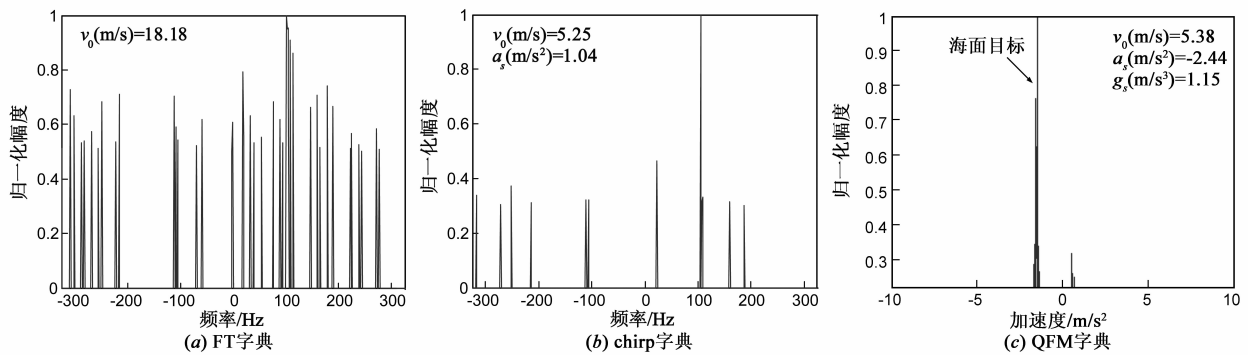


图9 MCA+CFAR检测结果($P_{fa}=10^{-4}$)

微动目标信号. 最后,得到微动信号的 QFM 字典检测结果,海杂波明显得到抑制,同时可获得更多目标运动信息,相比其它几种方法具有优异的杂波抑制和信号稀疏表示性能.

5.3 检测性能分析

图 10 采用 Monte Carlo 分析方法给出了基于 MCA 的微动目标检测性能曲线 ($P_{fa} = 10^{-3}$),可以看出,在强海杂波背景下 ($SCR = -5\text{dB}$),采用 FT 稀疏分解的检测方法的检测概率仅为 20%. 本节提出的检测方法采用 MCA,在微动目标信号的稀疏域检测,而海杂波不能稀疏表示,因此能够进一步改善 SCR,使得检测概率提升 40% 左右. 进一步在稀疏域对海杂波进行抑制,检测概率可达 75% 以上,性能改善明显.

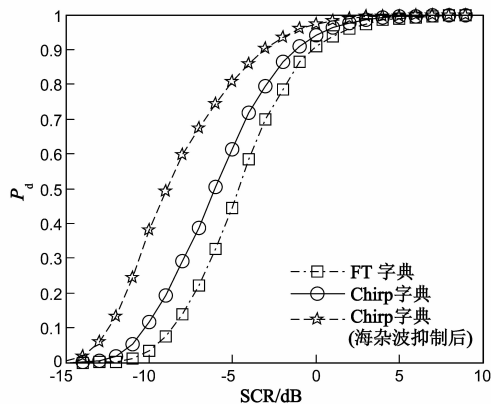
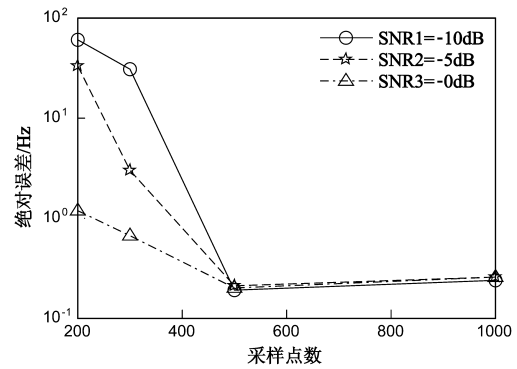


图10 基于MCA检测器的 P_d -SCR曲线(HH极化,IPIX-17#)

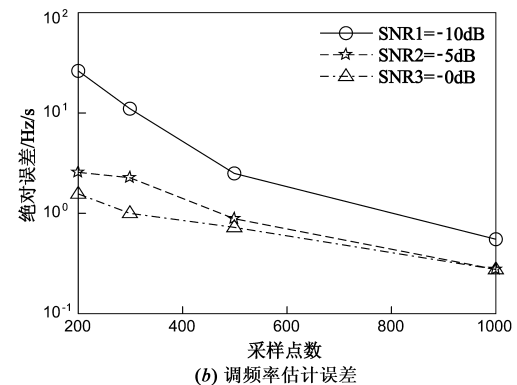
5.4 运算量分析

研究微动特征参数估计性能与采样点数的关系,图 11 给出了调频率和中心频率估计值的绝对误差. 可以看出:(1)随着采样点数的增加,估计误差减小且趋于稳定;(2)随着 SNR 的增加,参数估计误差逐渐减小,在较少的采样点数情况下尤为明显;(3)中心频率的估计误差在采样点数 500 开始稳定,表明采用较少的采样点数即可稀疏地表示微动信号,从而降低了运算量. 由于信号的稀疏表示有利于降低运算量,因此本文所提

方法相比于时频分析类检测方法在算法运算效率和时频分辨率等方面具有明显优势,能够满足工程应用的需求.



(a) 中心频率估计误差



(b) 调频率估计误差

图11 采样点数与微动参数估计性能的关系

6 结论

本文针对现有时频分析方法在时频分辨率以及运算效率方面的不足,采用稀疏表示分析方法对目标的微动特征进行分析及检测,利用信号组成成分的形态差异性,提出一种基于 MCA 的海杂波抑制与微动目标检测方法. 首先,研究了基于 MP 的微动信号稀疏表示方法,并介绍了 MCA 的基本原理,在此基础上建立了 MCA 模型;然后,充分利用海杂波和微动目标回波信号组成成分的形态差异性,对不同的源信号采用不同的

字典(FT 和 chirp 字典)进行稀疏表示,区分海杂波与微动目标。此外,提出了稀疏域海杂波抑制方法,在抑制海杂波的同时积累更多的信号能量,改善 SCR。最后,采用实测数据验证所提方法的有效性。

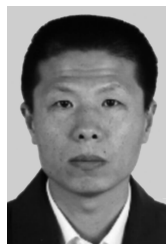
参考文献

- [1] Zuo Lei, Li Ming, Zhang Xiaowei, 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.
- [2] Chen Xiaolong, Guan Jian, et al. Detection and extraction of target with micromotion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2):1002-1018.
- [3] Luo Feng, Zhang Danting, Zhang Bo. 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.
- [4] V C Chen, F Y Li, S-S Ho, H Wechsler. Micro-Doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1):2-21.
- [5] 罗迎,张群,李松,等.基于分布式组网雷达的弹道目标三维进动特征提取[J].电子学报,2012,40(6):1079-1085. Luo Ying, Zhang Qun, Li Song, et al. Three-dimensional precession feature extraction of ballistic targets in distributed radar networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6):1079-1085.
- [6] 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 Zhaiwen, Liu Yongxiang, Li Xiang. The achievements of target characteristic with micro-motion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3):520-525.
- [7] Chen Xiaolong, Guan Jian, Liu Ningbo, 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.
- [8] 陈小龙,关键,何友.微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J].雷达学报,2013,2(1):123-134. 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.
- [9] Liu Zhen, Wei Xizhang, Li Xiang. Aliasing-free micro-Doppler analysis based on short-time compressed sensing [J]. IET Signal Processing, 2014, 8(2):176-187.
- [10] Liu Lihua, Du Xiaoyong, Mounir Ghogho, et al. Precession missile feature extraction using sparse component analysis of radar measurements[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 24(1):1-10.
- [11] 李映,张艳宁,许星.基于信号稀疏表示的形态成分分析:进展和展望[J].电子学报,2009,37(1):146-152. Li Ying, Zhang Yanning, Xu Xing. Advances and perspective on morphological component analysis based on sparse representation[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1):146-152.
- [12] S Grosdidier, A Baussard. Ship detection based on morphological component analysis of high-frequency surface wave radar images[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2012, 6(9):813-821.
- [13] Wang Qi, Matthew Pepin, Ryan J. Beach, et al. SAR-based vibration estimation using the discrete fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10):4145-4156.
- [14] Cai T T, Zhang A. Compressed sensing and affine rank minimization under restricted isometry[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(13):3279-3290.
- [15] 桂文明,刘睿凡,邵曦,等.基于匹配追踪的音符起始点检测[J].电子学报,2013,41(6):1225-1230. Gui Wenming, Liu Ruifan, Shao Xi, et al. Note onset detection based on matching pursuit [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6):1225-1230.
- [16] Bobin J, Starck J, Fadili J M, et al. Morphological component analysis: an adaptive thresholding strategy[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(11):2675-2681.
- [17] Maurizio Guida, Maurizio Longo, et al. Biparametric CFAR procedures for lognormal clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(3):798-809.

作者简介



陈小龙 1985 年生于山东烟台。海军航空工程学院电子信息工程系讲师,博士。获全军优秀硕士论文奖。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: cxlexl209@163.com



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。获全国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