

基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取

罗迎^{*①} 龚逸帅^{①②} 陈怡君^③ 张群^①

^①(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)

^②(中国人民解放军95561部队 拉萨 850000)

^③(武警工程大学信息工程学院 西安 710086)

摘要: 微动特征是空间目标识别的重要特征信息之一。然而, 现有的多功能多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)雷达通常需要在完成目标搜索和跟踪任务之后为目标微动特征提取分配大量连续的时间资源, 导致目标识别实时性能和雷达系统整体工作性能均不高。针对该问题, 该文提出了一种基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取方法。首先依据各目标的方位信息对MIMO雷达发射波形进行设计, 为不同方向目标同时发射跟踪脉冲; 在此基础上, 综合考虑目标微动特征提取性能以及目标跟踪性能的需求, 对跟踪脉冲的发射时间序列进行优化设计; 最后, 直接利用窄带跟踪脉冲实现对不同方向目标微动特征的同时提取, 无需再为目标微动特征提取分配额外的时间资源, 有效提升目标识别实时性和雷达工作效率。仿真实验表明, 在信噪比大于-10 dB时, 所提方法能够实现多目标微动特征的准确提取, 具有良好的有效性和鲁棒性。

关键词: MIMO雷达; 微动特征; 多目标; 跟踪脉冲

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)05-0575-10

DOI: 10.12000/JR18035

引用格式: 罗迎, 龚逸帅, 陈怡君, 等. 基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 575-584. DOI: 10.12000/JR18035.

Reference format: Luo Ying, Gong Yishuai, Chen Yijun, *et al.* Multi-target micro-motion feature extraction based on tracking pulses in MIMO radar[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 575-584. DOI: 10.12000/JR18035.

Multi-target Micro-motion Feature Extraction Based on Tracking Pulses in MIMO Radar

Luo Ying^① Gong Yishuai^{①②} Chen Yijun^③ Zhang Qun^①

^①(*Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China*)

^②(*Troop of No. 95561, PLA, Lasa 850000, China*)

^③(*College of Information Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China*)

Abstract: The micro-motion feature is one of the important characteristic information of spatial target recognition. However, the existing multifunctional Multi-Input Multi-Output (MIMO) radar usually has to allocate a large number of continuous time resources for target micro-motion feature extraction after target searching and tracking, which leads to a low real-time performance of target recognition and poor overall performance of radar system. To solve this problem, this paper presents a multi-target micro-motion feature extraction method for MIMO radar based on tracking pulses. First, according to the azimuth information of each target, the MIMO radar transmitting waveform is designed, and the tracking pulses are transmitted simultaneously for targets with different directions. On this basis, by considering the micro-motion feature extraction performance and the target tracking performance synthetically, the transmission time series of the tracking pulses are optimized. Finally, the narrowband tracking pulses are directly used to simultaneously

收稿日期: 2018-04-25; 改回日期: 2018-06-02; 网络出版: 2018-07-16

*通信作者: 罗迎 luoying2002521@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571457, 61631019)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571457, 61631019)

extract the micro-motion features of the targets in different directions, which makes it no longer necessary to allocate additional radar resources for target feature extraction. Consequently, the real-time recognition performance and the working efficiency of radar are improved significantly. Simulations demonstrate that when the signal-to-noise ratio is larger than -10 dB, the micro-motion features of multi-targets can be extracted accurately, which verifies the effectiveness and robustness of the proposed method.

Key words: Multi-Input Multi-Output (MIMO) radar; Micro-motion feature; Multi-target; Tracking pulses

1 引言

微动是指目标或目标部件除主体平动之外的振动、旋转等微小运动^[1]。微动特征是目标独一无二的特征,对各类航天器、卫星、弹道导弹、太空碎片等空间目标的分类与识别具有重要意义。近年来,雷达目标的微动特征提取已成为雷达信号处理领域的一个研究热点^[2-7],如文献^[5]详细分析了时频分析方法在微动特征提取中的应用;文献^[6]利用空间目标的微动特征实现了对目标的高分辨3维成像;文献^[7]将参数化稀疏表征的思想引入微动参数的估计中,准确获得了目标微动特征;文献^[8]利用微动特征实现了地面车辆目标和行人目标的分类识别;文献^[9]利用经验模态分解算法成功提取了锥体目标的进动特征以及目标纵横比;文献^[10]提出了一种正弦调频Fourier-Bessel变换用于精确提取目标的微动频率;等等。然而,现有目标微动特征提取方法需要为实现该功能单独发射大量连续的脉冲,而且在一个时刻只能针对一个方向的目标进行微动特征提取,对雷达资源消耗大,目标识别实时性不强,工作效率不高。尤其是在多任务条件下,现有微动特征提取方法难以满足空天目标探测与识别的需求。

通常,雷达发射窄带脉冲进行目标跟踪,若能利用这些窄带跟踪脉冲同时实现目标跟踪和微动特征提取,这样就无需再为目标微动特征提取分配额外的雷达资源,从而显著提高目标识别实时性和雷达整体工作效率。此外,多输入多输出(Multi-Input Multi-Output, MIMO)雷达具有多个发射和接收天线^[11,12],与传统相控阵雷达相比,其各发射阵元可独立发射信号,因而可以根据实际应用灵活地设计发射波形^[13-15]。通过对发射波形进行优化设计, MIMO雷达能够发射具有特定方向图的波形以实现对不同方向目标的同时观测。因此,本文希望利用MIMO雷达发射端的高自由度优势,同时为不同方向的目标发射跟踪脉冲,并进一步利用跟踪脉冲实现目标微动特征提取,从而节约雷达资源,提高目标识别实时性和雷达工作效率。

然而,雷达发射窄带脉冲对目标进行跟踪时,跟踪脉冲重复周期通常较大,若基于所发射的跟踪

脉冲直接采用时频分析技术进行微动特征提取会产生微多普勒信号频域混叠现象,无法获得理想的结果。因此,现有窄带信号微动特征提取方法大多不再适用,需要研究低重频条件下的微动特征提取方法。此外,由于跟踪脉冲既用于目标跟踪,也用于微动特征提取,基于对目标微动特征提取性能以及目标跟踪性能的综合考虑,对脉冲发射的时间序列进行优化设计可进一步提升雷达系统的整体工作性能。需要说明的是,为了节约雷达资源和保持现有目标跟踪模式基本不变,在对跟踪脉冲发射时间序列进行优化设计时,通常需要保证与现有目标跟踪方式相比,跟踪脉冲重复周期不会发生较大改变。

综上所述,本文提出一种基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取方法。该方法首先根据各目标方位信息对MIMO雷达发射波形进行设计,从而获得期望的发射方向图,为不同方向的目标同时发射跟踪脉冲;在此基础上,综合考虑目标微动特征提取性能和目标跟踪性能,将微动特征提取性能作为优化目标函数,将目标跟踪性能作为约束条件,建立跟踪脉冲发射时间序列优化模型,实现跟踪脉冲发射时刻的优化;最后,直接利用窄带跟踪脉冲,采用正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法实现目标微动特征提取。

2 MIMO雷达波形设计

MIMO雷达系统的发射阵列为包含 M 个阵元的均匀线阵,阵元间距为 d ,如图1所示。

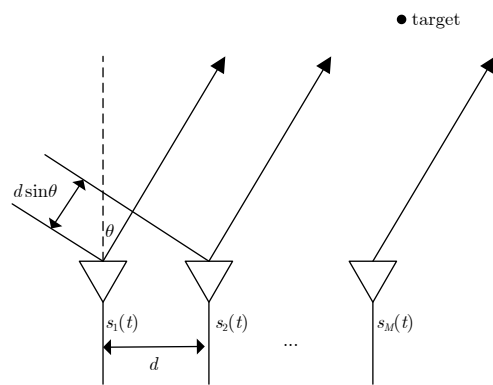


图 1 MIMO雷达发射阵列示意图

Fig. 1 Transmit array of MIMO radar

第 m 个阵元发射的信号为：

$$s_m(t) = x_m(t) e^{j2\pi f_c t}, \quad 0 \leq t \leq T_p \quad (1)$$

其中， $x_m(t)$ 为第 m 个阵元发射的基带信号， f_c 为信号载频， T_p 为脉冲宽度。则远场 θ 方向处的合成信号可表示为：

$$\begin{aligned} s(\theta, t) &= \sum_{m=1}^M s_m \left(t + \frac{(m-1)d \sin \theta}{c} \right) \\ &= \sum_{m=1}^M x_m \left(t + \frac{(m-1)d \sin \theta}{c} \right) \\ &\quad \cdot e^{j2\pi f_c \left(t + \frac{(m-1)d \sin \theta}{c} \right)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中， c 为光速。

在实际应用中，考虑离散基带发射信号，即 $x_m(l) = x_m(t)|_{t=(l-1)T_s}$ ， $l = 1, 2, \dots, L$ ，其中 L 为脉冲内的采样点数， T_s 为采样间隔，则脉冲宽度为 $T_p = T_s \cdot L$ 。则远场 θ 方向处的合成信号可表示为：

$$\mathbf{S}(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{X} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{a}(\theta) = [1 \ e^{j2\pi d \sin \theta / \lambda} \ \dots \ e^{j2\pi (M-1) d \sin \theta / \lambda}]^H$ 为发射导向矢量， λ 为发射信号波长。 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^H \ \mathbf{x}_2^H \ \dots \ \mathbf{x}_M^H]^H$ 为阵列发射的信号矩阵， \mathbf{x}_m 为第 m 个阵元发射的基带信号且 $\mathbf{x}_m \in \mathbb{C}^{1 \times L}$ 。

远场 θ 方向处的合成信号的功率为：

$$P(\theta) = \frac{1}{L} \mathbf{S}(\theta) \mathbf{S}^H(\theta) = \mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{R} \mathbf{a}(\theta) \quad (4)$$

其中， $\mathbf{R} = \mathbf{X} \mathbf{X}^H / L$ 为阵列发射信号的协方差矩阵。 $\{P(\theta_k)\}_{k=1}^K$ 反映了发射信号功率在空域的分布，即为MIMO雷达的发射方向图， $\{\theta_k\}_{k=1}^K$ 为离散化方位角， θ_k 处的半波束宽度记为 $B(\theta_k)$ 。因此，可以通过对阵列发射信号的协方差矩阵 \mathbf{R} 进行设计以获取实际所需的发射方向图。

根据需要同时观测的目标数量和方位来确定期望发射方向图 $\{P_d(\theta_k)\}_{k=1}^K$ 。假设需要同时对 H 个目标发射跟踪脉冲，第 h 个目标的方位角为 θ_h ，第 h_1 个目标和第 h_2 个目标之间的方位角之差记为 $\Delta\theta(h_1, h_2)$ ，则期望发射方向图 $\{P_d(\theta_k)\}_{k=1}^K$ 应满足

$$\left. \begin{aligned} \forall h \in 1, \dots, H, \quad P_d(\theta_h) &= 1 \\ \forall h_1, h_2 \in 1, \dots, H, \quad h_1 \neq h_2, \quad B(\theta_h) &< \Delta\theta(h_1, h_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

采用方向图匹配方法对MIMO雷达发射波形进行设计。利用所设计方向图与期望方向图逼近的思想，建立如下优化模型：

$$\left. \begin{aligned} \min_{\alpha, \mathbf{R}} \quad & \sum_{k=1}^K w_k \left[\alpha P_d(\theta_k) - \mathbf{a}^H(\theta_k) \mathbf{R} \mathbf{a}(\theta_k) \right]^2 \\ \text{s.t.} \quad & R_{mm} = 1, \quad m = 1, 2, \dots, M \\ & \mathbf{R} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中， $w_k \geq 0$ 为方位角 θ_k 处的逼近加权， α 为尺度因子， R_{mm} 为协方差矩阵 \mathbf{R} 的第 (m, m) 个元素。约束条件保证了各阵元的发射功率相同， $\mathbf{R} \geq 0$ 保证了雷达发射信号协方差矩阵的半正定性。该优化模型可以用凸优化工具包进行求解。

通过对上述优化模型进行求解可以得到雷达发射信号的协方差矩阵 \mathbf{R} ，但阵列发射的信号矩阵 \mathbf{X} 仍然未知，无法获取每个阵元具体的发射信号。为了获得恒模发射波形，基于循环算法对协方差矩阵匹配下的发射波形进行优化

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & \left\| \mathbf{X} - \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{U} \right\| \\ \text{s.t.} \quad & |X(m, l)| = 1/M \\ & m = 1, 2, \dots, M, \quad l = 1, 2, \dots, L \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{R}^{1/2}$ 为协方差矩阵的Hermite均方根， \mathbf{U} 为半正交矩阵，维数为 $M \times L$ 。

通过对发射信号矩阵 \mathbf{X} 和半正交矩阵 \mathbf{U} 的交替求解，可以最终得到雷达的发射信号矩阵，从而在空域合成所需的发射方向图以实现对不同方向目标同时发射跟踪脉冲。

3 跟踪脉冲发射时间优化与微动特征提取

以旋转目标为例，基于第2节中设计的发射波形对目标的窄带雷达回波信号进行分析。设在第 $\{h\}_{h=1}^H$ 个目标方向，即在远场 θ_h 方向处的旋转目标为散射点模型且已完成了平动补偿，如图2所示。经过时间 τ 的运动，目标上第 i 个散射点 E_i 以角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 转动到 E'_i ，目标的旋转矢量为 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$ ，在起始时刻目标散射点 E_i 的坐标向量为 $\mathbf{r}_0 = (r_{x0} \ r_{y0} \ r_{z0})^T$ ， E'_i 的坐标向量为 $\mathbf{r} = (r_x \ r_y \ r_z)^T$ ，本地坐标系 (x, y, z) 中的向量乘以欧拉旋转矩阵 \mathbf{R}_{init} 就可以变换为参考坐标系 (X, Y, Z) 中的向量，即 $\widehat{\mathbf{w}} = (\omega_X \ \omega_Y \ \omega_Z)^T = \mathbf{R}_{\text{init}} \boldsymbol{\omega}$ ， $\widehat{\mathbf{r}}_0 = (r_{X0} \ r_{Y0} \ r_{Z0})^T = \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_0$ 。旋转运动可以用一个参考坐标系中的旋转矩阵 $\mathbf{R}_{\text{rotating}}$ 来描述，即有 $\widehat{\mathbf{r}} = \mathbf{R}_{\text{rotating}} \widehat{\mathbf{r}}_0$ 。

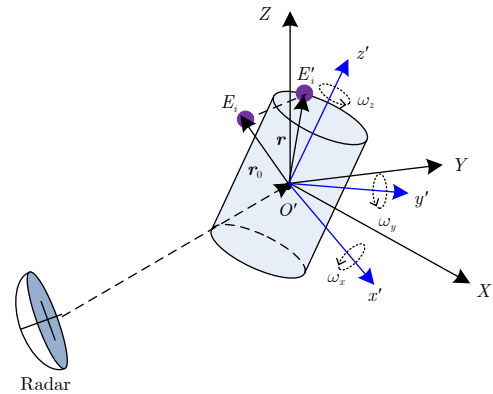


图2 旋转目标的几何模型

Fig. 2 Geometry of a rotating target

由式(2)可知, 在 θ_h 方向处, 目标上第 i 个散射点 E_i 的慢时间基带回波信号为:

$$s_{ri}(\theta_h, \tau) = \sigma_i \sum_{m=1}^M x_m \left(t + \frac{(m-1)d \sin \theta_h}{c} - \frac{2R_i(\tau)}{c} \right) \cdot e^{j2\pi f_c \left(\frac{(m-1)d \sin \theta_h}{c} - \frac{2R_i(\tau)}{c} \right)}, \tau \in [0, T_c] \quad (8)$$

其中, σ_i 为该散射点的反射系数, $R_i(\tau)$ 为瞬时斜距, T_c 为方位向积累时间。在远场条件下, 基于平面波近似, $R_i(\tau)$ 可写为:

$$R_i(\tau) = \|\mathbf{R}_{\text{rotating}} \widehat{\mathbf{r}}_0\| \quad (9)$$

其中, $\mathbf{R}_{\text{rotating}} = \exp\left(\|\widehat{\mathbf{w}}\| \widehat{\mathbf{w}}' \tau\right)$, 旋转角速度单位向量为 $\widehat{\mathbf{w}}' = \widehat{\mathbf{w}} / \|\widehat{\mathbf{w}}\| = (\omega'_X \ \omega'_Y \ \omega'_Z)^T$, 则

$$\widehat{\mathbf{w}}' = \begin{bmatrix} 0 & -\omega'_Z & \omega'_Y \\ \omega'_Z & 0 & -\omega'_X \\ -\omega'_Y & \omega'_X & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$d(\mathbf{w}_{n_x n_y n_z}, \mathbf{r}_{0n_{rx} n_{ry} n_{rz}}) = \sum_{m=1}^M x_m \left(t + \frac{(m-1)d \sin \theta_h}{c} - \frac{2 \|\exp(\mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{w}_{n_x n_y n_z} n \Delta \tau) \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_{0n_{rx} n_{ry} n_{rz}}\|}{c} \right) \cdot \exp\left(j2\pi f_c \left(\frac{(m-1)d \sin \theta_h - 2 \|\exp(\mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{w}_{n_x n_y n_z} n \Delta \tau) \mathbf{R}_{\text{init}} \mathbf{r}_{0n_{rx} n_{ry} n_{rz}}\|}{c} \right)\right), \quad n = 1, \dots, N \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{w}_{n_x n_y n_z} = [\omega_x n_x \ \omega_y n_y \ \omega_z n_z]^T = \left[\Omega_{x \min} + (n_x - 1) \cdot \frac{\Omega_{x \max} - \Omega_{x \min}}{N_x} \right. \\ \left. \Omega_{y \min} + (n_y - 1) \cdot \frac{\Omega_{y \max} - \Omega_{y \min}}{N_y} \quad \Omega_{z \min} + (n_z - 1) \cdot \frac{\Omega_{z \max} - \Omega_{z \min}}{N_z} \right]^T, \\ n_x = 1, 2, \dots, N_x; \ n_y = 1, 2, \dots, N_y; \ n_z = 1, 2, \dots, N_z \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_{0n_{rx} n_{ry} n_{rz}} = [r_{x0} n_{rx} \ r_{y0} n_{ry} \ r_{z0} n_{rz}]^T = \left[R_{x0 \min} + (n_{rx} - 1) \cdot \frac{R_{x0 \max} - R_{x0 \min}}{N_{rx}} \right. \\ \left. R_{y0 \min} + (n_{ry} - 1) \cdot \frac{R_{y0 \max} - R_{y0 \min}}{N_{ry}} \quad R_{z0 \min} + (n_{rz} - 1) \cdot \frac{R_{z0 \max} - R_{z0 \min}}{N_{rz}} \right]^T, \\ n_{rx} = 1, 2, \dots, N_{rx}; \ n_{ry} = 1, 2, \dots, N_{ry}; \ n_{rz} = 1, 2, \dots, N_{rz} \quad (14)$$

在式(12)到式(14)中, $([\Omega_{x \min}, \Omega_{x \max}], [\Omega_{y \min}, \Omega_{y \max}], [\Omega_{z \min}, \Omega_{z \max}])$, $([R_{x0 \min}, R_{x0 \max}], [R_{y0 \min}, R_{y0 \max}], [R_{z0 \min}, R_{z0 \max}])$ 分别表示 \mathbf{w} 和 \mathbf{r}_0

的取值范围; $\left(\frac{\Omega_{x \max} - \Omega_{x \min}}{N_x}, \frac{\Omega_{y \max} - \Omega_{y \min}}{N_y}, \frac{\Omega_{z \max} - \Omega_{z \min}}{N_z}\right)$ 和 $\left(\frac{R_{x0 \max} - R_{x0 \min}}{N_{rx}}, \frac{R_{y0 \max} - R_{y0 \min}}{N_{ry}}, \frac{R_{z0 \max} - R_{z0 \min}}{N_{rz}}\right)$ 分别为 \mathbf{w} 和 \mathbf{r}_0 的搜索步进增量。

脉冲发射时间间隔 $\Delta\tau=1/F_2$, F_2 为微多普勒信号不存在频域混叠现象时的脉冲重复频率, 总脉冲数

设 θ_h 方向处目标由 J 个散射点组成, 则可以得到目标的基带回波信号为:

$$s_r(\theta_h, \tau) = \sum_{i=1}^J \sigma_i \cdot \sum_{m=1}^M x_m \left(t + \frac{(m-1)d \sin \theta_h}{c} - \frac{2R_i(\tau)}{c} \right) \cdot e^{j2\pi f_c \left(\frac{(m-1)d \sin \theta_h - 2R_i(\tau)}{c} \right)} \quad (11)$$

近年来, OMP算法被广泛应用在稀疏信号的分解与重构中。因此, 本节中利用OMP算法来实现雷达目标微动特征提取。由OMP算法原理可知, 根据信号本身的固有特性构造字典中的原子, 可以实现信号的分解与重构^[16,17]。从式(11)中可以看出, 目标各微动点回波由参数 $(\mathbf{w}, \mathbf{r}_0)$ 确定, 因此, 通过设定 $\mathbf{w} = (\omega_x \ \omega_y \ \omega_z)^T$, $\mathbf{r}_0 = (r_{x0} \ r_{y0} \ r_{z0})^T$ 的不同取值来构造原子集 \mathbf{D} 中的原子

$N = F_2 \cdot T_c$ 。利用跟踪脉冲进行微动特征提取时, 设跟踪脉冲重复频率为 F_1 , $Q = F_1 \cdot T_c + 1$ 为实际发射跟踪脉冲数。记 $\varepsilon = \lfloor F_2/F_1 \rfloor$, 则目标跟踪脉冲回波信号 $s_r(\theta_h, \tau)$ 可表示为:

$$\mathbf{s}_r = \Phi \mathbf{D} \beta \quad (15)$$

其中, β 表示脉冲重复频率取 F_2 时回波信号在原子集 \mathbf{D} 上的投影系数。观测矩阵 Φ 为一个0-1矩阵, 具体形式为:

$$\Phi = \{\phi_{i,i'}\} = \begin{cases} 1, & \{(i, i') | i' = \varepsilon \cdot i\} \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, Q \quad (16)$$

通常, 目标散射分布具有空域稀疏特性, 因此 β 中只有少量非零元素。显然, 式(15)是一个典型的压缩感知模型, 当满足有限等距性质(Restricted Isometry Property, RIP)时, 通过求解一个最优化问题即可实现对 β 的重构

$$\min \|\beta\|_1, \quad \text{s.t. } \Phi D\beta = s_t \quad (17)$$

在压缩感知重构过程中, 感知矩阵 $\Theta = \Phi D$ 的正交性越好, 算法的重构概率越高, 微动特征的提取精度也就越高。实际上, 观测矩阵 Φ 的具体形式与脉冲信号的发射时间序列一一对应。基于对微动特征提取性能以及目标跟踪性能的考虑建立观测矩阵优化模型(本质上即跟踪脉冲发射时间序列优化模型):

$$\left. \begin{aligned} & \min_{\Phi} \left\| (\Phi D)^H (\Phi D) - I \right\|_2 \\ & \text{s.t. } \Phi(i, j) = 0, 1, \quad i = 1, 2, \dots, Q; \\ & \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad j = 1, 2, \dots, N \\ & \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^N \Phi(i, j) = Q \\ & \sum_{i=1}^Q \Phi(i, j) \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, N \\ & \rho(1) = 1 \\ & \rho(\varepsilon \cdot Q) = 1 \\ & \sum_{i=-\kappa}^{\kappa+1} \rho(\varepsilon \cdot \mu + i) \geq 1, \quad \mu = 1, 2, \dots, Q-1 \end{aligned} \right\} (18)$$

其中, I 为维数为 $N_{r0}N_w$ 的单位阵, $N_{r0} = N_{rx} \cdot N_{ry} \cdot N_{rz}$, $N_w = N_x \cdot N_y \cdot N_z$ 。第1个约束条件限制了观

测矩阵 Φ 为0-1矩阵; 第2个约束条件限制了实际发射总脉冲数为 Q , 即保证发射脉冲数与目标跟踪所需的脉冲数保持一致, 不额外发射脉冲; 第3个约束条件保证了在每个时刻最多只发射一个脉冲; 第4个约束条件和第5个约束条件保证了观测时间长度为 T_c , 即在第1个时刻和最后一个时刻必须发射脉冲, 其中 $\rho = \sum_{i=1}^Q \Phi_i$, Φ_i 为观测矩阵 Φ 中的第 i 行; 第6个约束条件限制了实际脉冲发射时刻仅在时间窗 w 允许的范围内进行调整, 即保证与现有目标跟踪方式相比, 跟踪脉冲重复周期不发生较大改变, 从而避免目标失跟, 其中, $\kappa = \lfloor w/T_2 \rfloor$, $T_2 = 1/F_2$ 。

针对式(18)所示的优化模型, 本文采用遗传算法对观测矩阵 Φ 进行求解。在得到最优观测矩阵 Φ 后, 即可得到所设计的跟踪脉冲最优发射时间序列 $t_m = \gamma \cdot T_2$, 其中 $\gamma = \{j | \rho(j) = 1, j = 1, 2, \dots, N\}$ 。此时, 目标基带回波信号和观测矩阵可分别表示为:

$$s_s(\theta_h, \tau) = \sum_{i=1}^J \sigma_i \sum_{m=1}^M \mathbf{x}_m \cdot e^{j2\pi f_c \left(\frac{(m-1)d \sin \theta_h}{c} - \frac{2R_i(t_m)}{c} \right)} \quad (19)$$

$$\Phi_s = \{\phi_{i,i'}\} = \begin{cases} 1, & \{(i, i') | i' = \gamma(i)\} \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad i = 1, \dots, Q \quad (20)$$

利用OMP算法求解优化模型 $\min \|\beta\|_1$, s.t. $\Phi_s D\beta = s_s$, 根据 β 中非零元素所对应的原子 w 和 r_0 的取值, 即可实现对目标微动特征参数 w 和 r_0 的有效提取。

综上所述, 图3给出了所提微动特征提取方法的完整流程。

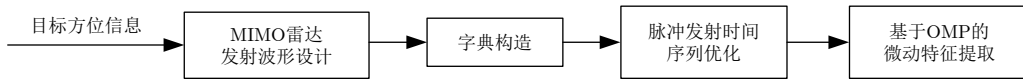


图3 算法流程

Fig. 3 Flow chart of the algorithm

4 实验结果

设MIMO雷达系统包含 $M = 20$ 个发射阵元, 阵元间距 $d = c/(2f_c)$, 发射信号载频 $f_c = 1$ GHz, 观测时间 $T_c = 3$ s, 雷达发射信号脉宽 $T_p = 1$ μ s, 每个脉冲内的采样点数 $L = 400$, 离散化方位角总

数 $K = 181$, 时间窗 $w = 20$ ms, 跟踪脉冲发射重复频率 $F_1 = 8$ Hz, 微多普勒信号不存在频域混叠现象时的脉冲重复频率 $F_2 = 800$ Hz。

假设在 -30° 和 0° 两个方向分别存在旋转目标, 其参数如表1所示, 其中目标参考点坐标以雷

表1 目标参数

Tab. 1 The parameters of the targets

目标方位($^\circ$)	参考点坐标(km)	旋转角速度($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	目标散射点坐标(m)
-30	(15, 26, 0)	$(\pi, \pi/2, \pi)$	(0, 0, 0), (1, 1, 0), (-1, -1, 0)
0	(0, 40, 0)	(0, 0, π)	(2, 0, 0), (-2, 0, 0), (0, -2, 0), (0, 2, 0)

达所在位置为坐标原点，目标散射点坐标以目标参考点为原点。

所设计的发射方向图和期望方向图如图4所示。期望方向图由采用30 dB切比雪夫权的传统波束的主瓣构成。根据目标的方位信息，期望发射方向图的主瓣区域设置为 $[-40^\circ, -20^\circ] \cup [-10^\circ, 10^\circ]$ 。由图可以看出所设计波形在 -30° 和 0° 两个目标方向形成波束，与期望发射方向图逼近，利用该发射波形可实现对 -30° 方向和 0° 方向目标的同时观测。

图5给出了在满足时间窗约束的条件下，采用文献[18]中所提随机稀疏采样多普勒解模糊算法重构出的信号时频分布图。由表2所示的微动特征提取结果可以看出该方法成功提取出了 -30° 方向目标的微动特征，而对于 0° 方向的目标，该方法提取出了错误的特征。这是因为文献[18]中的脉冲发射时间序列是随机设定的，而本文所提方法考虑到脉冲发射时间序列是与观测矩阵 Φ 的具体形式一一对应的，因此，将脉冲发射时间序列优化问题转化为

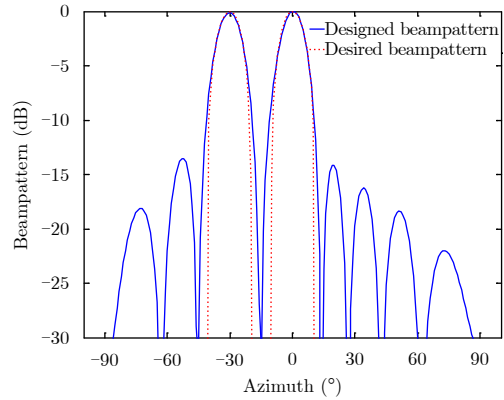


图 4 发射方向图

Fig. 4 The transmit beam pattern

观测矩阵优化问题，以最大化感知矩阵正交性为目标，对观测矩阵 Φ 进行优化，本质上实现了脉冲发射时间序列的优化。因此，与文献[18]方法相比，本文所提方法的信号重构性能显著提高。对于 0° 方向目标，在脉冲数较少时，文献[18]方法得到的感知矩阵的列相关性较大，从而无法正确提取目标微

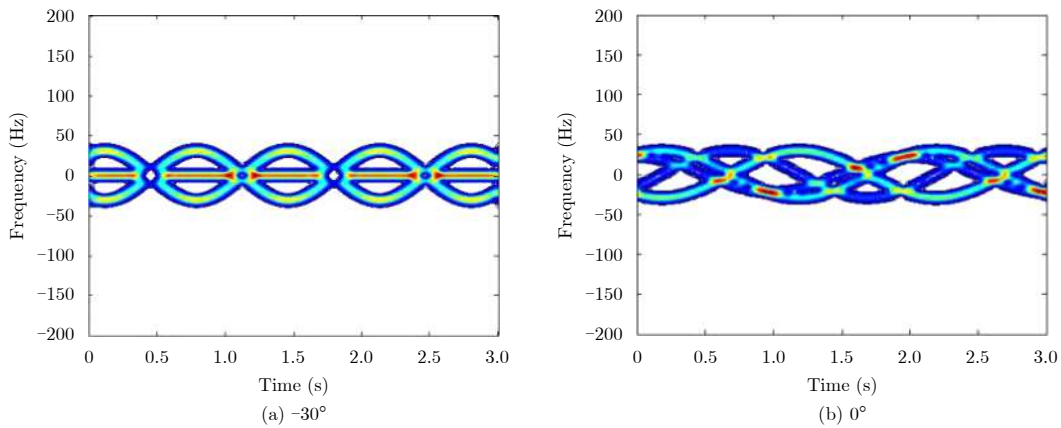


图 5 无噪声条件下文献[18]方法重构的时频分布

Fig. 5 The reconstructed time-frequency distribution using method in Ref. [18] without noise

表 2 文献[18]方法目标微动特征提取结果

Tab. 2 The micro-motion features of targets obtained by method in Ref. [18]

目标方向(°)	特征参数序号	目标散射点坐标 r_0 (m)	旋转角速度 ω ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	系数A
-30	1	(0.1 0 - 0.1)	(3.14 1.57 3.14)	30.40
	2	(1 1 0)	(3.14 1.57 3.14)	27.07
	3	(-1.0 - 1.1 0)	(3.14 1.57 3.14)	25.11
	4	(0.3 0 0)	(3.14 1.57 3.14)	5.96
	5	(1.5 - 1.2 0)	(2.83 1.57 3.14)	4.29
0	1	(-1.8 0.1 0)	(0.31 0 2.51)	29.15
	2	(0.1 - 1.9 0)	(0.31 0 2.51)	28.10
	3	(0.5 2.4 0)	(0.31 0 2.51)	24.27
	4	(2.6 - 0.2 0)	(0.31 0 2.51)	23.31
	5	(-1.9 - 0.4 0)	(0 0.31 2.83)	3.15

动特征，而本文所提方法能够最大化感知矩阵列之间的正交性，因此能够有效提取目标微动特征。

图6(a)和图7(a)给出了在无噪声环境下，利用本文所设计的脉冲发射时刻 t_m 对目标回波信号进行采样后，采用OMP算法重构出的信号时频分布图，由表3所示的微动特征提取结果可以看出算法成功提取出了 -30° 方向和 0° 方向目标中旋转散射

点的微动特征，微动特征参数的取值均与真实值接近，证明了本文所提算法的有效性。

图6(b)和图7(b)给出了在信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)为 -10 dB的环境下，采用所提方法重构出的信号时频分布图。由表4所示的微动特征提取结果可以看出算法在低信噪比环境中仍成功提取出了 -30° 方向和 0° 方向目标中旋转散射点

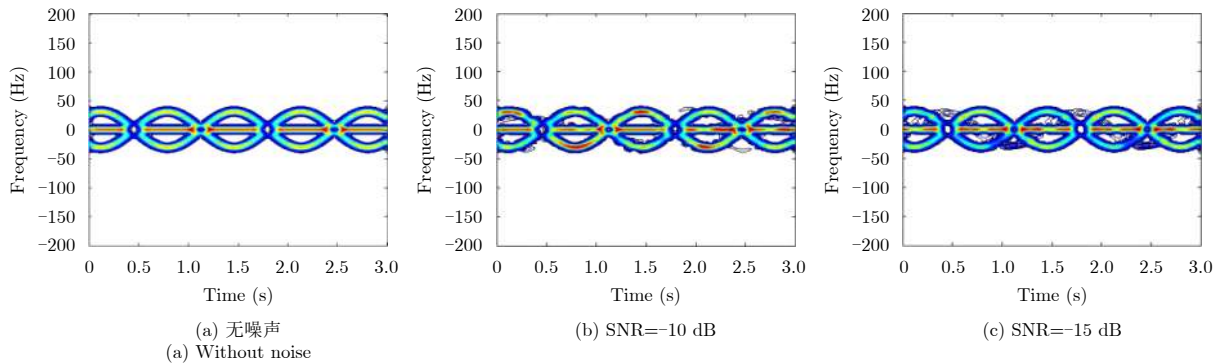


图 6 -30° 方向所提方法重构的时频分布

Fig. 6 The reconstructed time-frequency distribution in -30° direction using the proposed method

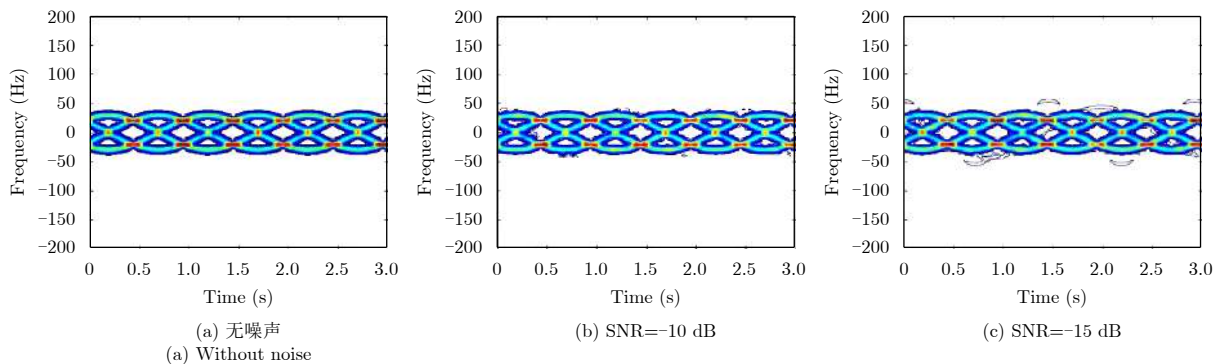


图 7 0° 方向所提方法重构的时频分布

Fig. 7 The reconstructed time-frequency distribution in 0° direction using the proposed method

表 3 无噪声条件下所提方法目标微动特征提取结果

Tab. 3 The micro-motion features of targets obtained by the proposed method without noise

目标方向($^\circ$)	特征参数序号	目标散射点坐标 r_0 (m)	旋转角速度 w ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	系数A
-30	1	(0.1 0 -0.1)	(3.14 1.57 3.14)	27.23
	2	(1 1 0)	(3.14 1.57 3.14)	26.47
	3	(-1.0 -1.1 0)	(3.14 1.57 3.14)	26.01
	4	(-1.3 -1.2 0)	(2.83 1.57 3.14)	6.40
	5	(0.3 0 0)	(3.14 1.88 3.14)	6.06
0	1	(2.0 0.1 0)	(0 0 3.14)	28.63
	2	(-1.9 0 0)	(0 0 3.14)	28.39
	3	(0.1 -2.0 0)	(0 0 3.14)	27.71
	4	(0 1.9 0)	(0 0 3.14)	27.19
	5	(1.8 0.1 0.3)	(0 0.31 2.83)	6.72

的微动特征,证明了本文算法在低信噪比环境下的鲁棒性。当信噪比进一步降为-15 dB时,由表5可以看出,由于噪声的影响,图6(c)和图7(c)所示的时频分布图与图6(a)和图7(a)相比能量聚集性也有所下降,提取出4个散射点的微动特征之外还提取出了虚假的微动参数。

为了对算法性能进行定量分析,定义两个性能指标:真实散射点的特征参数提取精度 E ;虚假散射点与真实散射点的能量比 ξ 。假设第 h 个目标上共有 g_h 个散射点,各散射点的真实坐标和旋转角速度分别为 \mathbf{r}_{0,g_h} 和 \mathbf{w}_{g_h} ,所提方法获得的相应散射点的特征提取结果分别为 \mathbf{r}'_{0,g_h} 和 \mathbf{w}'_{g_h} ,则特征参数提取精度 E 定义如下:

$$E = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \sum_{g=1}^{g_h} \frac{1}{g_h} \left(\frac{\|\mathbf{r}_{0,g} - \mathbf{r}'_{0,g}\|_2}{\|\mathbf{r}_{0,g}\|_2} + \frac{\|\mathbf{w}_g - \mathbf{w}'_g\|_2}{\|\mathbf{w}_g\|_2} \right) \quad (21)$$

假设对于第 h 个目标,所提方法共提取出 B_h 组微动特征参数,相应的强度系数记为 A_{B_h} 。显然,

B_h 组微动特征参数中有 g_h 组对应目标真实散射点,其余 $B_h - g_h$ 组对应虚假散射点,则虚假散射点与真实散射点的能量比 ξ 定义如下:

$$\xi = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \left(\frac{\sum_{b=g_h+1}^{B_h} A_b}{\sum_{b=1}^{g_h} A_b} \right) \quad (22)$$

显然, E 和 ξ 越小,算法性能越好。图8给出了 E 和 ξ 随信噪比的变化曲线,可以看出,当信噪比大于-10 dB时,虽然虚假散射点与真实散射点的能量比 ξ 随着信噪比的降低而缓慢增加,但 ξ 的取值始终较小,而特征参数提取精度 E 则始终保持不变,说明算法能够有效提取出目标真实散射的微动特征参数,具有良好的鲁棒性。当信噪比小于-10 dB时, E 和 ξ 快速增大,算法性能显著退化,不仅真实散射点的特征提取误差较大,而且由于虚假散射点与真实散射点的能量比 ξ 显著增大,导致虚假散射点的出现,难以满足雷达目标微动特征提取需求。

表 4 SNR=-10 dB条件下所提方法目标微动特征提取结果

Tab. 4 The micro-motion features of targets obtained by the proposed method when SNR=-10 dB

目标方向(°)	特征参数序号	目标散射点坐标 \mathbf{r}_0 (m)	旋转角速度 \mathbf{w} (rad·s ⁻¹)	系数 A
-30	1	(0.1 0 -0.1)	(3.14 1.57 3.14)	26.83
	2	(1 1 0)	(3.14 1.57 3.14)	25.48
	3	(-1.0 -1.1 0)	(3.14 1.57 3.14)	25.09
	4	(-1.3 -1.2 0)	(2.83 1.57 3.14)	7.78
	5	(0.3 0 0)	(3.14 1.88 3.14)	7.31
0	1	(2.0 0.1 0)	(0 0 3.14)	27.52
	2	(-1.9 0 0)	(0 0 3.14)	27.28
	3	(0.1 -2.0 0)	(0 0 3.14)	26.59
	4	(0 1.9 0)	(0 0 3.14)	26.08
	5	(1.8 0.1 0.3)	(0 0.31 2.83)	9.15

表 5 SNR=-15 dB条件下所提方法目标微动特征提取结果

Tab. 5 The micro-motion features of targets obtained by the proposed method when SNR=-15 dB

目标方向(°)	特征参数序号	目标散射点坐标 \mathbf{r}_0 (m)	旋转角速度 \mathbf{w} (rad·s ⁻¹)	系数 A
-30	1	(0.2 0.1 -0.1)	(3.14 1.57 3.14)	25.73
	2	(0.9 1.0 0)	(3.14 1.57 3.14)	23.27
	3	(-1.2 -1.0 0.1)	(3.14 1.57 3.14)	22.16
	4	(-1.5 -1.3 0)	(2.83 1.57 3.14)	15.04
	5	(0.8 0 0.5)	(2.83 2.19 3.14)	10.58
0	1	(2.2 -0.1 0)	(0 0 3.14)	26.81
	2	(-2.0 0.1 0)	(0 0 3.14)	25.35
	3	(0.2 -1.8 0)	(0 0 3.14)	25.19
	4	(0.1 1.8 0.2)	(0 0 3.14)	24.07
	5	(1.7 0.3 0.4)	(0 0.31 2.83)	13.15

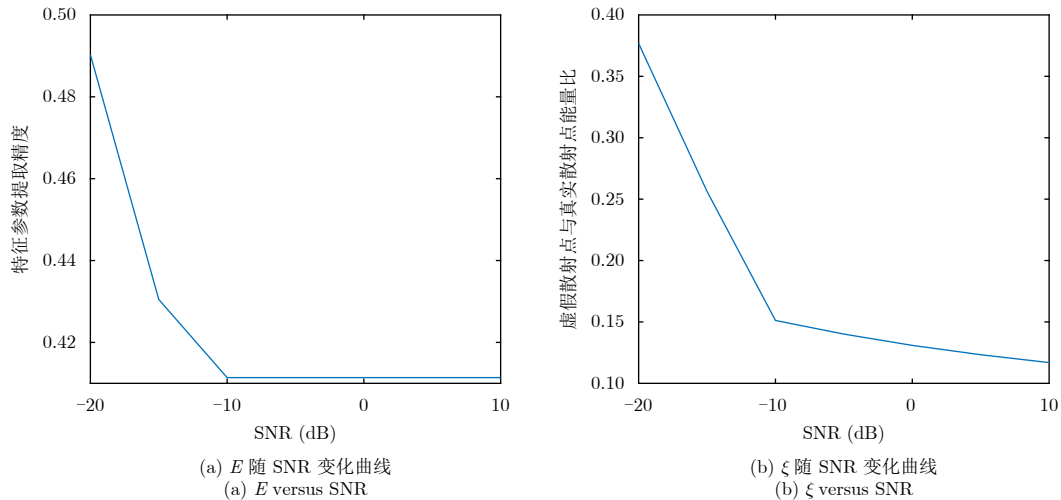


图 8 算法性能随信噪比变化曲线

Fig. 8 The performance curve versus SNR

5 结束语

本文针对现有多功能MIMO雷达的多目标微动特征提取效率不高的问题,提出了一种基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提取方法。首先基于设计方向图与期望方向图逼近的思想,对MIMO雷达发射波形进行优化设计;在此基础上,建立跟踪脉冲发射时间序列优化模型并求解;最后直接利用窄带跟踪脉冲,采用OMP算法实现目标微动特征提取。该方法能够同时对不同方向的目标发射跟踪脉冲,从而同时提取多个目标的微动特征参数,相较于传统雷达对不同方向目标进行逐个微动特征提取的工作模式,提高了雷达系统的工作效率。本文可为提升MIMO雷达的空间目标探测能力提供参考。在后续的研究工作中,需进一步考虑空间目标微动形式的多样性,研究能够适用于各类微动目标的多目标特征提取方法。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q, Luo Y, and Chen Y A. Micro-Doppler Characteristics of Radar Targets[M]. Jonathan Simpson, United Kingdom: Elsevier Science, 2016: 4–6.
- [2] 杨琪, 邓彬, 王宏强, 等. 太赫兹雷达目标微动特征提取研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 22–45. DOI: [10.12000/JR17087](https://doi.org/10.12000/JR17087).
Yang Qi, Deng Bin, Wang Hong-qiang, *et al.*. Advancements in research on micro-motion feature extraction in the terahertz region[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 22–45. DOI: [10.12000/JR17087](https://doi.org/10.12000/JR17087).
- [3] 陈小龙, 董云龙, 李秀友, 等. 海面刚体目标微动特征建模及特性分析[J]. 雷达学报, 2015, 4(6): 630–638. DOI: [10.12000/JR15079](https://doi.org/10.12000/JR15079).
Chen Xiao-long, Dong Yun-long, Li Xiu-you, *et al.*. Modeling of micromotion and analysis of properties of rigid marine targets[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 630–638. DOI: [10.12000/JR15079](https://doi.org/10.12000/JR15079).
- [4] 冯存前, 李靖卿, 贺思三, 等. 组网雷达中弹道目标微动特征提取与识别综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(6): 609–620. DOI: [10.12000/JR15084](https://doi.org/10.12000/JR15084).
Feng Cun-qian, Li Jing-qing, He Si-san, *et al.*. Micro-Doppler feature extraction and recognition based on netted radar for ballistic targets[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(6): 609–620. DOI: [10.12000/JR15084](https://doi.org/10.12000/JR15084).
- [5] Chen V C, Li F, 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.
- [6] Bai X R, Zhou F, and Bao Z. High-resolution three-dimensional imaging of space targets in micromotion[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3428–3440. DOI: [10.1109/JSTARS.2015.2431119](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2431119).
- [7] Li G and Varshney P K. 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): 4937–4948. DOI: [10.1109/JSTARS.2014.2318596](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2318596).
- [8] Du L, Ma Y Y, Wang B S, *et al.*. Noise-robust classification of ground moving targets based on time-frequency feature from micro-Doppler signature[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(8): 2672–2682. DOI: [10.1109/JSEN.2014.2314219](https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2314219).
- [9] 牛杰, 刘永祥, 秦玉亮, 等. 一种基于经验模态分解的锥体目标雷达微动特征提取新方法[J]. 电子学报, 2011, 39(7): 1712–1715.
Niu Jie, Liu Yong-xiang, Qin Yu-liang, *et al.*. A new method of radar micro-motion feature extraction of cone target based on empirical mode decomposition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(7): 1712–1715.

- [10] 何其芳, 张群, 罗迎, 等. 正弦调频Fourier-Bessel变换及其在微动目标特征提取中的应用[J]. 雷达学报, 待出版. DOI: [10.12000/JR17069](https://doi.org/10.12000/JR17069).
He Qi-fang, Zhang Qun, Luo Ying, *et al.* A sinusoidal frequency modulation Fourier-Bessel transform and its application to micro-Doppler feature extraction[J]. *Journal of Radars*, in press. DOI: [10.12000/JR17069](https://doi.org/10.12000/JR17069).
- [11] Li J and Stoica P. MIMO radar with colocated antennas[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106–114. DOI: [10.1109/MSP.2007.904812](https://doi.org/10.1109/MSP.2007.904812).
- [12] Ma C Z, Yeo T S, Liu Z F, *et al.* Target imaging based on $l_1 l_0$ norms homotopy sparse signal recovery and distributed MIMO antennas[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(4): 3399–3414. DOI: [10.1109/TAES.2015.140939](https://doi.org/10.1109/TAES.2015.140939).
- [13] Li J, Stoica P, and Zheng X Y. Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3959–3968. DOI: [10.1109/TSP.2008.923197](https://doi.org/10.1109/TSP.2008.923197).
- [14] 李慧, 赵永波, 程增飞. 基于线性调频时宽的MIMO雷达正交波形设计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(5): 1151–1158. DOI: [10.11999/JEIT170426](https://doi.org/10.11999/JEIT170426).
Li Hui, Zhao Yong-bo, and Cheng Zeng-fei. MIMO radar orthogonal waveform set design based on chirp durations[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(5): 1151–1158. DOI: [10.11999/JEIT170426](https://doi.org/10.11999/JEIT170426).
- [15] 李玉翔, 任修坤, 孙扬, 等. 一种循环迭代的宽带MIMO雷达正交稀疏频谱波形设计方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 953–959. DOI: [10.11999/JEIT160597](https://doi.org/10.11999/JEIT160597).
Li Yu-xiang, Ren Xiu-kun, Sun Yang, *et al.* Cyclic iterative method for wideband MIMO radar orthogonal sparse frequency waveform design[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 953–959. DOI: [10.11999/JEIT160597](https://doi.org/10.11999/JEIT160597).
- [16] Mallat S G and Zhang Z F. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397–3415. DOI: [10.1109/78.258082](https://doi.org/10.1109/78.258082).
- [17] Chen Y J, Zhang Q, Ma C Z, *et al.* Micromotion feature extraction of radar target using tracking pulses with adaptive pulse repetition frequency adjustment[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083569. DOI: [10.1117/1.JRS.8.083569](https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.083569).
- [18] 叶淋美. 基于压缩感知的雷达信号处理应用研究[D]. [硕士论文], 厦门大学, 2014: 17–34.
Ye Lin-mei. Study on application of compressive sensing in radar signal processing[D]. [Master dissertation], Xiamen University, 2014: 17–34.

作者简介



罗迎(1984–), 男, 湖南益阳人, 现为空军工程大学信息与导航学院副教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像与目标识别。

E-mail: luoying2002521@163.com

龚逸帅(1994–), 女, 湖南岳阳人, 现为中国人民解放军95561部队工程师, 研究方向为MIMO雷达信号处理。

E-mail: 13575012196@163.com



陈怡君(1989–), 女, 陕西西安人, 现为武警工程大学信息工程学院讲师, 研究方向为认知成像与目标识别。

E-mail: chenyijun519@126.com



张群(1964–), 男, 陕西合阳人, 现为空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、雷达成像与目标识别。

E-mail: zhangqunnus@gmail.com