

曲线交叠外推的微动多目标宽带分辨算法

魏嘉琪^{①②} 张磊^{*①②} 刘宏伟^{①②} 盛佳恋^③

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

^③(上海无线电设备研究所 上海 201109)

摘要: 针对传统的微多普勒特征提取技术难以解决多目标分辨和微动参数估计这一问题, 该文针对进动多目标, 提出一种曲线交叠外推的微动多目标宽带分辨算法。该算法以各个滤波数据点间的相对距离为准则, 结合各曲线的历史斜率信息, 对交叠点后的点迹进行外推估计, 实现各个分量信号微动曲线的区分关联。在此基础上, 通过分析各曲线的微动特性差异实现多目标分辨。仿真实验验证了所提算法的有效性和稳定性。

关键词: 多目标分辨; 微动特征提取; 数据关联; 参数估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2889-07

DOI: 10.11999/JEIT190033

A Novel Micro-motion Multi-target Wideband Resolution Algorithm Based on Curve Overlap Extrapolation

WEI Jiaqi^{①②} ZHANG Lei^{①②} LIU Hongwei^{①②} SHENG Jialian^③

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding at Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: To solve the problem that the traditional micro-Doppler feature extraction technologies are generally hard to achieve resolution and parameter estimation of multi-target, a novel curve overlap extrapolation algorithm for wide-band resolution of micro-motion multi-target is proposed. According to the relative distance between filtering data points and the historical slope information of each curve, the point trace behind the overlapping location can be extrapolated to realize data association of micro-motion curve for each signal component. On this basis, the multi-target resolution can be realized by analyzing the difference of micro-motion characteristics between each curve. Extensive simulation experiments are provided to illustrate the effectiveness and robustness of the proposed algorithm.

Key words: Multi-target resolution; Micro-motion feature extraction; Data association; Parameter estimation

1 引言

弹道导弹已成为现代战争中的主导武器, 在导弹飞行中段往往存在多目标情形, 空间多目标的监测识别及参数估计对促进空间技术发展具有重要意义, 基于微动特征的目标识别技术是实现空间多目标分辨与识别的有效途径之一^[1,2]。在多个目标上

的微动散射点共同作用下, 受微动调制的雷达回波信号表现为多分量正弦调频信号^[3], 通过从微动信号中提取目标的微动特征, 可为目标探测和识别提供良好的信息^[4-6]。

从公开文献来看, 弹道目标的微动特征提取大都针对孤立目标进行研究。当多个目标位于雷达天线同一波束范围内, 各目标的回波信号在时域、多普勒域相互叠加, 多目标分辨和微动参数估计变得十分困难。文献[7]提出了基于时频最大幅值的瞬时频率估计方法提取目标微动周期, 根据各目标周期差异实现多目标分辨, 然而该方法只适用于单成分信号或在时频面无交叠的多成分信号; 文献[8]提出一种基于跟踪脉冲的MIMO雷达多目标微动特征提

收稿日期: 2019-01-15; 改回日期: 2019-04-24; 网络出版: 2019-05-22

*通信作者: 张磊 leizhang@xidian.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61771372, 61771367), 上海市自然科学基金(16ZR1434900)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771372, 61771367), The Natural Science Foundation of Shanghai (16ZR1434900)

取方法。文献[9]提出一种正弦调频变换的群目标微动特征提取及群目标分离重构的算法,文献[10]提出了基于正弦调频傅里叶变换的群目标分辨方法,但该方法仅适用于窄带雷达信号。在宽带多目标情况下,多目标微动曲线会交叠在一起,通过对各目标回波微动曲线进行分离并提取相应的微动特征是多目标分辨的有效途径^[11,12]。文献[13]提出了一种基于点迹-曲线关联算法的空间群目标分辨方法;文献[14]提出了一种滑动窗轨迹跟踪的方法完成对混叠m-D曲线的有效分离,实现群目标分辨。然而在实际应用中,以上两种方法在微动曲线交叠较复杂的情况下实用性不强。利用多目标跟踪技术实现曲线区分关联为微动曲线分离及特征提取提供了又一技术思路。文献[15]和文献[16]采用了最临近数据算法(NNDA)进行曲线分离和特征提取,但由于在目标数较多且杂波密度大的环境下,该算法缺少考虑多个目标间的相互影响,导致跟踪性能不理想,可能会出现误跟和丢失目标现象。

针对以上问题,本文提出了一种基于曲线交叠外推的微动多目标宽带分辨算法,首先建立多散射中心旋转对称目标模型,对距离-慢时间回波信号进行点迹凝聚处理抑制1维距离像旁瓣^[17],接着根据各滤波数据点间的相对距离并结合各曲线的历史信息,对交叠点后的点迹进行外推估计,实现交叠微动曲线的区分关联,并通过RTS平滑滤波器改善微动曲线毛刺现象^[18],最后估计各条微动曲线微动频率,完成多目标分辨^[19]。相较于文献[15]和文献[16]所提基于NNDA的数据关联算法,本文算法对于目标数目较多的情况仍适用,并且算法复杂度较低,适用范围更广。仿真结果表明该算法可有效区分关联交叠情况复杂的多条微动曲线,实现多目标分辨,可广泛应用于弹道目标的参数估计、目标识别等实际任务中。

2 回波信号模型

建立弹道多目标模型如图1所示, (O, X, Y, Z) 为雷达坐标系, (o, x, y, z) 参考坐标系, 与雷达坐标系平行, r_{LOS} 为雷达视线。弹道目标外形一般近似于锥体, 其散射模型示意图如图2所示。锥体弹道目标等效散射中心主要包括锥顶散射点与锥底边缘散射点, 分别是图中的 p_1, p_2, p_3 。实际由于遮挡效应, 目标的等效散射中心只有锥顶散射点 p_1 和靠近雷达视线的锥底散射点 p_2 。 H 为锥体高度, r 为底面半径, d 为质心距锥顶的距离。目标进动时, 其绕自旋轴 oa 以角速度 w_s 旋转, 同时绕锥旋轴 om 以角速度 w_c 做锥旋运动, 自旋轴 oa 和锥旋轴 om 的夹角即为进动角 θ 。

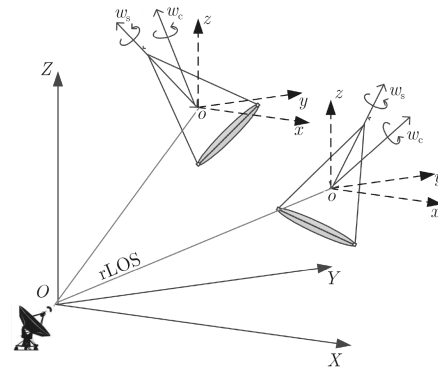


图1 多目标模型

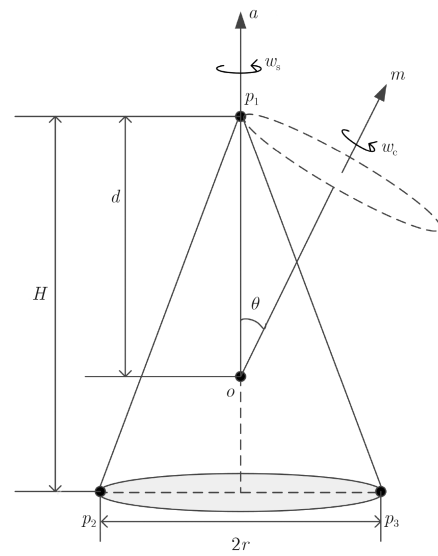


图2 弹道目标散射模型示意图

宽带雷达弹道目标观测任务一般采用线性调频信号作为发射信号, 对目标各散射点回波进行解线调频处理, 并消除包络斜置、残余视频项并距离维脉冲压缩后, 天线接收到的散射点 p 距离-慢时间回波信号表示为

$$S_p(f, t_m) = \sigma_p T \text{sinc} \left\{ T \left[f + \frac{2\mu}{c} R_{\Delta p}(t_m) \right] \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta p}(t_m) \right] \quad (1)$$

其中, σ_p 为射点 p 的散射系数, T 为脉冲重复周期, μ 为调频率, t_m 为慢时间, λ 为波长, c 为光速。对应的1维距离像峰值位于 $f = -\frac{2\mu}{c} R_{\Delta p}(t_m)$ 处。通过乘以因子 $-\frac{c}{2\mu}$, f 可以转化为散射点 p 到参考点的径向距离 $R_{\Delta p}(t_m) = r_p(t_m) - R_{re}(t_m)$, 其中 $r_p(t_m)$ 表示 t_m 时刻散射点 p 到天线的距离, $R_{re}(t_m)$ 表示参考距离。

根据式(1), $S_p(f, t_m)$ 的相位受 $R_{\Delta p}(t_m)$ 的调制, 导致信号在慢时间域产生微多普勒效应。那么, 在距离-慢时间像中, 散射点 p 距离像的峰值为随 $R_{\Delta p}(t_m)$ 变化的微动曲线, 那么 $R_{\Delta p}(t_m)$ 表示散射点的微动量, 它对于锥顶和锥底散射点有不同含义: 锥顶散射点位于自旋轴上, 其微动形式仅为锥旋运动, 在远场近似条件下, 根据图1中雷达与目标的几何关系, 有

$$R_{\Delta p}(t_m) = r_p(t_m) - R_{re}(t_m) \approx [\mathbf{R}_c(t_m) \mathbf{r}_{0p}]^T \mathbf{n} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{R}_c(t_m) = \mathbf{I} + \mathbf{e}_c \sin(\omega_c t_m) + \mathbf{e}_c^2 [1 - \cos(\omega_c t_m)]$ 为锥旋矩阵, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, $\mathbf{e}_c$ 为锥旋斜对称矩阵, $\mathbf{r}_{0p}$ 为初始时刻散射点 p 在参考坐标系中坐标对应向量, $\mathbf{n}$ 为雷达视线方向单位向量。对于锥底散射点 p_2 , 将其视为滑动散射中心, 此时有

$$R_{\Delta p}(t_m) = (H-d) \cos \beta(t_m) - r \sin \beta(t_m) \quad (3)$$

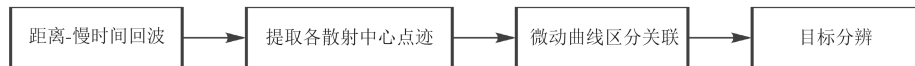


图3 整体思路图

3 多目标微动曲线区分关联

3.1 点迹凝聚处理

为了便于分离相互交叠的微多普勒曲线, 本文对距离-慢时间回波信号每一时刻的频谱做恒虚警(CFAR), 得到一系列频率点, 但由于分辨精度问题, 一个散射中心会检测到多个连续频点, 这就需要由所得到的频率点进行点迹凝聚处理, 来抑制1维距离像旁瓣。点迹凝聚是对每一时间的各个散射中心的频点数据求质心, 将质心作为估计的瞬时多普勒频率值。计算质心公式为

$$f_d = \frac{\sum_{i=1}^n f_i E_i}{\sum_{i=1}^n E_i} \quad (4)$$

其中 n 为一个散射中心获得点迹的个数, f_i 为第 i 个点迹的频点, E_i 为第 i 个点迹的幅值。

3.2 扩展卡尔曼滤波及运动模型

目标运动过程中散射中心随姿态角不断变化, 会发生角闪烁现象。传统卡尔曼滤波方法要求噪声为高斯白噪声, 而角闪烁现象呈现出非高斯长拖尾分布, 这会导致传统卡尔曼滤波方法在处理角闪烁噪声时性能急剧下降。近年来使用扩展卡尔曼滤波的方法来抑制角闪烁, 该方法不再将状态传递函数看做一个常矩阵, 而是将之定义为一个时变的非线性函数, 可减小雷达指向误差。

其中, $\beta(t_m) = \arccos((\mathbf{R}_{rot}(t_m) \mathbf{l}_0)^T \mathbf{n})$ 为雷达视线与空间锥体目标对称轴的夹角, $\mathbf{l}_0 = (0, 0, 1)^T$ 为空间锥体目标对称轴的初始单位矢量, $\mathbf{R}_{rot}(t_m) = \mathbf{R}_c(t_m) \mathbf{R}_s(t_m)$ 为总的旋转矩阵, $\mathbf{R}_s(t_m) = \mathbf{I} + \mathbf{e}_s \sin(\omega_s t_m) + \mathbf{e}_s^2 [1 - \cos(\omega_s t_m)]$ 为自旋矩阵, $\mathbf{e}_s$ 为自旋斜对称矩阵。

当宽带雷达作用于进动多目标时, 多目标上各散射点微动曲线表现为正弦函数或正弦函数的叠加, 当多个目标位于雷达天线同一波束范围内, 就会出现交叠现象。因此本文通过将交叠的微动曲线区分关联, 完成对多目标的分辨及参数估计。本文首先对距离-慢时间回波信号中各散射中心点迹进行提取, 接着着重介绍了以曲线交叠外推算法作为关联算法来实现微动曲线区分关联, 最后依据各曲线微动参数完成多目标的分辨。整体思路图如图3所示, 下面分别对各个部分进行详细介绍。

由于上述角闪烁现象, 并且弹道锥体目标散射点微动形式为正弦函数或正弦函数的叠加, 本文利用正弦模型的扩展卡尔曼滤波更准确地描述微动曲线。扩展卡尔曼滤波器的详细设计在此不再赘述, 仅给出滤波器的状态方程、观测方程和雅克比矩阵。扩展卡尔曼滤波的状态方程为

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{q}_{k-1}, k = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中, Δt 为采样间隔, 下标 k 表示第 k 个采样, 过程噪声 $\mathbf{q}_{k-1}$ 为零均值协方差矩阵为 $\mathbf{Q}_{k-1}$ 的高斯噪声, 状态向量 $\mathbf{x}_k$ 为 $\mathbf{x}_k = (\theta_k, \omega_k, a_k)^T$, 式中 θ_k , ω_k 和 a_k 分别表示 k 时刻正弦曲线的相位、角速度和幅度。

观测方程为

$$y_k = a_k \sin(\theta_k) + r_k \quad (6)$$

其中, 观测噪声 r_k 为零均值方差为 σ_k 的高斯噪声。

雅克比矩阵为

$$\mathbf{H}(k) = (a_k \cos(\theta_k), 0, \sin(\theta_k)) \quad (7)$$

3.3 RTS平滑算法

由于本文所提关联算法嵌入在扩展卡尔曼滤波中, 受噪声和距离分辨率的影响, 曲线分离结果会出现“突跳”误差, 考虑到RTS平滑算法对噪声的抑制效果要比单纯的扩展卡尔曼滤波效果好, 故将其与扩展卡尔曼滤波算法相结合, 对分离后的曲线执行逆向平滑, 实现对滤波结果的优化。

RTS平滑解算需要在扩展卡尔曼滤波过程中实时存储数据, 所存储的数据包括: 滤波值 $\mathbf{x}_{f,k}$, 预测值 $\mathbf{x}_{f,k+1/k}$, 滤波均方差 $\mathbf{P}_{f,k}$, 预测均方差 $\mathbf{P}_{f,k+1/k}$ 和状态转移矩阵 Φ_{k+1}^T 。平滑公式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}_{s,k} &= \mathbf{P}_{f,k} \Phi_{k+1}^T \mathbf{P}_{f,k+1/k}^{-1} \\ \mathbf{x}_{s,k} &= \mathbf{x}_{f,k} + \mathbf{K}_{s,k} (\mathbf{x}_{s,k+1} - \mathbf{x}_{f,k+1/k}) \\ \mathbf{P}_{s,k} &= \mathbf{P}_{f,k} - \mathbf{K}_{s,k} (\mathbf{P}_{f,k+1/k} - \mathbf{P}_{s,k+1}) \mathbf{K}_{s,k}^T \\ k &= N-1, N-2, \dots, 1, 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, $\mathbf{P}_{s,N} = \mathbf{P}_{f,N}$, $\mathbf{x}_{s,N} = \mathbf{x}_{f,N}$ 。 $\mathbf{x}_{s,k}$ 为RST平滑值, $\mathbf{K}_{s,k}$ 为滤波增益, $\mathbf{P}_{s,k}$ 为协方差矩阵。

3.4 曲线交叠处外推算法

在完成点迹凝聚处理的基础上, 本节介绍利用曲线交叠外推算法实现微动曲线的区分关联。该算法依据各个滤波数据点间的相对距离判断各散射点微动曲线的相交情况, 然后根据历史信息计算交点处的斜率并外推交点之后若干点的点迹, 完成点迹与曲线的关联配对, 实现微动曲线的区分关联。

经过点迹凝聚处理后距离-慢时间平面内所有回波频点构成 $M \times N$ 维矩阵 $\mathbf{S}(f, t_m)$, M 是距离维采样点数, N 是方位维采样点数, $\mathbf{S}(f, t_m)$ 中包含 G 条待分离的微动曲线。曲线交叠外推算法的具体步骤为:

步骤 1 k 时刻对点迹进行扩展卡尔曼滤波, 并依据各个滤波数据点间的相对距离判断各散射点微动曲线的相交情况, 当 k 时刻 n 个滤波数据点间的相对距离相差小于门限 Γ , 即

$$|a_{k,i} \sin(\theta_{k,i}) - a_{k,j} \sin(\theta_{k,j})| < \Gamma, \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (9)$$

其中, $a_{k,i}$ 和 $a_{k,j}$ 分别表示第 i 个和第 j 个数据点所在正弦曲线幅度, $\theta_{k,i}$ 和 $\theta_{k,j}$ 分别表示第 i 个和第 j 个数据点所在正弦曲线相位, 则表明这 n 个数据点所在微动曲线在该时刻相交, 执行步骤2, 否则继续执行步骤1;

步骤 2 根据历史信息分别计算 n 个相交曲线的斜率 $b_i, i = 1, 2, \dots, n$, 并由当前滤波值和各曲线的斜率外推后 M 个滤波估计值

$$\begin{aligned} a_{k+m,i} \sin(\theta_{k+m,i}) &= b_i \times m + a_{k,i} \sin(\theta_{k,i}), \\ m &= 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (10)$$

步骤 3 对第 $k+M+1$ 时刻的点迹执行步骤1;

步骤 4 对关联后的曲线进行RTS平滑, 去除不同散射中心微动曲线的“突跳”误差。

为了更清楚地说明本文算法, 具体流程图如图4所示。

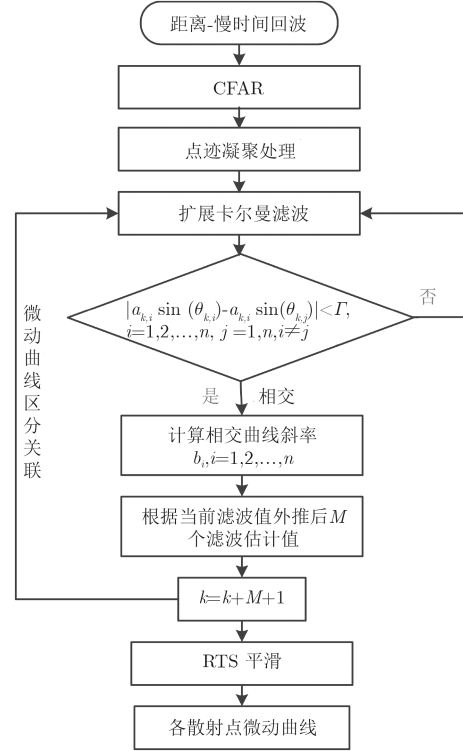


图4 算法流程图

4 多目标分辨及微动参数估计

对于进动目标而言, 目标上各散射点的微动变化曲线为正弦函数或正弦函数的叠加形式, 频点位置由锥旋频率 f_c 和自旋频率 f_s 确定, 故对高频、搬移后零频频点位置进行分析后可估计微动参数。

由于锥顶散射点位于自旋轴上, 且锥底散射点视为滑动散射点, 自旋对锥顶散射点和锥底散射点的影响不大, 故可直接确定各散射中心进动频率:

$$F = \text{FFT}(X_p(t_m)) \quad (11)$$

$$\hat{f}_c = \langle \max(F) \rangle \quad (12)$$

其中, $X_p(t_m)$ 为第 p 个散射点微动曲线, F 代表估计所得瞬时距离曲线频谱, $\hat{f}_c$ 为第 p 散射点进动频率估计值。通过各散射点微动曲线的微动频率分量, 确定其所属目标情况, 即可完成多目标分辨。

5 仿真实验

本实验雷达目标模型如图1所示, 场景中包含两个弹道目标, 在一个波束宽度内两弹道目标质心径向距离大小是1.5 m, 弹道目标形状如图2所示, 主要目标参数如表1所示, 主要雷达参数如表2所示。

5.1 微动曲线区分关联

首先, 根据图1弹道目标微动模型和微动参数设定, 获得天线接收距离-慢时间回波如图5所示。

表 1 实验锥体目标参数

	锥体高度 H (m)	质心到锥顶距离 d (m)	底面半径 r (m)	自旋频率 f_s (Hz)	锥旋频率 f_c (Hz)	进动角 θ (°)
目标1	1.26	0.42	0.25	3	5	10
目标2	3.50	0.82	1.64	4	6	15

表 2 雷达系统主要参数

参数	数值
载频 f_0	10 GHz
带宽 B	1 GHz
脉冲宽度 t_p	10 μ s
脉冲重复周期prf	100 Hz
驻留时间 T	1 s
雷达视线方位角 α	90°
雷达视线俯仰角 β	60°

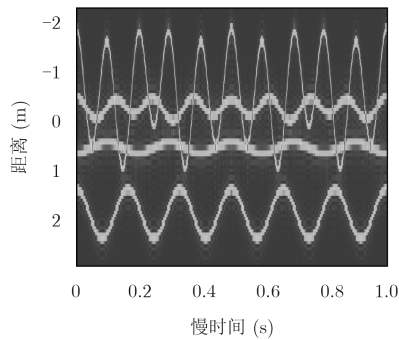


图 5 距离-慢时间回波

然后对距离-慢时间回波信号进行点迹凝聚处理抑制1维距离像旁瓣，得到一系列交叠的点迹，结果如图6所示。接着利用本文方法对交叠的微动曲线进行区分关联，由于扩展卡尔曼滤波存在较大的初始误差，需要一定时间才能达到收敛，故截取 $t_m = 0.05 \sim 1$ s时间区间的数据关联结果，如图7所示，可以看出该方法可有效分离交叠的微动曲线，但各条曲线上存在不同程度的“突跳”，故利用RTS平滑算法对各条微动曲线进行平滑，结果如图8所示。可以看出相较图7，图8曲线更连续平滑。

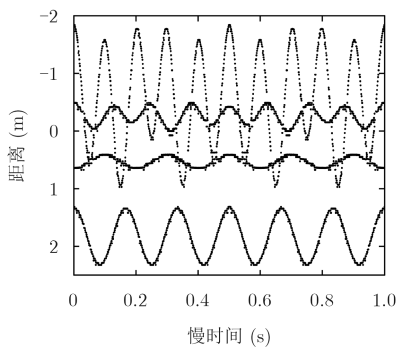


图 6 点迹凝聚处理结果

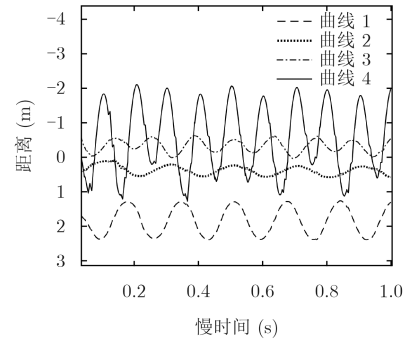


图 7 数据关联结果

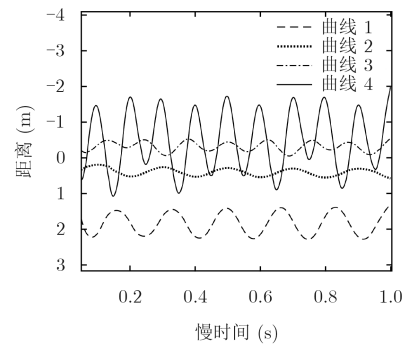


图 8 RTS平滑结果

为对比本文方法区分关联的准确性，在相同的实验条件下，使用参考文献[16]中用到的NNDA算法对曲线进行区分关联，所得结果如图9所示，可以看出，由于目标数目较多，对第4条微动曲线出现了误跟现象，参考文献[16]算法在该实验条件下失效，而本文算法可以较准确地区分关联各散射点微动曲线。

为验证本文算法的鲁棒性，设置 $\text{SNR} = -15 \sim 20$ dB进行噪声稳健性分析，结合第 p 个散射点瞬时微动曲线估计值 $F_{pe}(t_m)$ ，第 p 个散射点瞬时微动曲线理论值 $F_{pr}(t_m)$ ，给出式(13)定义估计结果的相似度

$$A_p = \left(1 - \frac{\sum_{t_m} |F_{pr}(t_m) - F_{pe}(t_m)|}{\sum_{t_m} |F_{pr}(t_m)|} \right) \times 100\% \quad (13)$$

其他条件不变的情况下，在各信噪比下进行50次蒙特卡洛实验，所得各曲线估计结果相似度如图10所示。

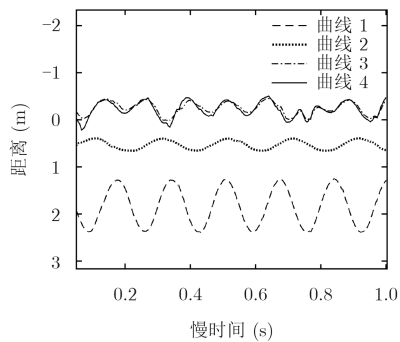


图9 文献[16]区分关联结果

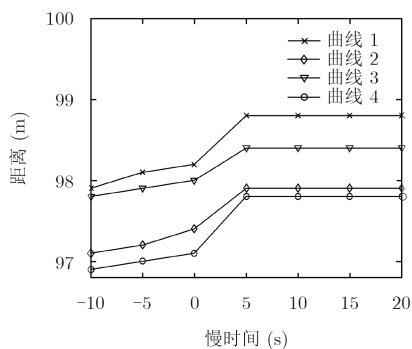


图10 曲线估计结果相似度

由图10可以看出,在信噪比较低的情况下,曲线估计相似度虽有一定程度的降低,但相似度仍在96%以上,可以说明本文算法有较高稳定性。

5.2 多目标分辨及参数估计

对分离后的各条微动曲线进行傅里叶变换,并利用第4节方法求得各条曲线进动频率,所求结果如表3所示。

表3 微动参数估计结果

	曲线1	曲线2	曲线3	曲线4
进动频率(Hz)	5.1333	6.0971	5.9924	5.0565

将表3估计结果与表1中实际参数进行对比可以看出,曲线1和曲线4的进动频率估计值近似为5 Hz,曲线2和曲线3的进动频率估计值近似为6 Hz,可以判断曲线1和曲线4对应散射点位于目标1,曲线2和曲线3对应散射点位于目标2,估计结果与实际参数一致,从而完成分辨。

6 结束语

本文以旋转对称的弹道锥体目标为模型,通过点迹凝聚处理多目标距离-慢时间回波抑制其1维距离像旁瓣,在此基础上,利用曲线交叠外推算法结合扩展卡尔曼滤波器实现了对交叠微动曲线的有效分离,根据各曲线的频谱信息估计各散射点微动参数,分析微动参数差异完成多目标分辨。实验结果

表明本文算法可有效区分交叠的微动曲线,具有较高稳健性。实际情况中,目标的运动方式和形状会更加复杂,后续工作将对这一情况下的多目标分辨及参数估计工作开展进一步研究。

参考文献

- [1] CHEN V C, LI Fayin, 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. doi: 10.1109/TAES.2006.1603402.
- [2] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. *雷达学报*, 2018, 7(5): 531–547. doi: 10.12000/JR18049.
- [3] ZHANG Qun, HU Jian, LUO Ying, *et al.* Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(5): 531–547. doi: 10.12000/JR18049.
- [4] SPARR T and KRANE B. Time-frequency analysis of vibrating targets in airborne SAR systems[J]. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 173–176. doi: 10.1049/ip-rsn:20030447.
- [5] 束长勇, 张生俊, 黄沛霖, 等. 基于微多普勒的空间锥体目标微动分类[J]. *北京航空航天大学学报*, 2017, 43(7): 1387–1394. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0500.
- [6] SHU Changyong, ZHANG Shengjun, HUANG Peilin, *et al.* Micro-motion classification of spatial cone target based on micro-Doppler[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 43(7): 1387–1394. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0500.
- [7] FAN Huayu, REN Lixiang, LONG Teng, *et al.* A high-precision phase-derived range and velocity measurement method based on synthetic wideband pulse Doppler radar[J]. *Science China Information Sciences*, 2017, 60(8): 082301. doi: 10.1007/s11432-016-0097-4.
- [8] 周叶剑, 张磊, 菅毛, 等. 多频调频稀疏分解的微动目标参数估计方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(10): 2360–2365. doi: 10.11999/JEIT170163.
- [9] ZHOU Yejian, ZHANG Lei, JIAN Mao, *et al.* Micro-motion estimation for ballistic targets with multi-frequency chirp decomposition[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2360–2365. doi: 10.11999/JEIT170163.
- [10] LIU Yongxiang, CHEN Hangyong, LI Xiang, *et al.* Radar micro-motion target resolution[C]. 2006 International Conference on Radar. Shanghai, China, 2006. doi: 10.1109/ICR.2006.343363.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [9] 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, 2018, 7(5): 593–601. doi: 10.12000/JR17069.
- HE Qifang, 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*, 2018, 7(5): 593–601. doi: 10.12000/JR17069.
- [10] 杨陈, 池龙, 张群, 等. 正弦调频傅里叶变换的自旋微动群目标分辨[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2016, 17(3): 51–56. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.010.
- YANG Chen, CHI Long, ZHANG Qun, *et al.* Resolution of group targets with spinning micro-motion based on sinusoidal frequency modulation Fourier transform[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2016, 17(3): 51–56. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.010.
- [11] 杨陈, 池龙, 张群, 等. 基于宽带雷达距离-慢时间像的自旋微动群目标分辨[J]. 弹箭与制导学报, 2017, 37(3): 101–104. doi: 10.15892/j.cnki.djzdx.2017.03.026.
- YANG Chen, CHI Long, ZHANG Qun, *et al.* Resolution of group targets with spinning micro-motion based on the range slow-time image of broadband radar[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2017, 37(3): 101–104. doi: 10.15892/j.cnki.djzdx.2017.03.026.
- [12] 罗迎, 柏又青, 张群, 等. 弹道目标平动补偿与微多普勒特征提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 602–608. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607.
- LUO Ying, BAI Youqing, ZHANG Qun, *et al.* Translational motion compensation and micro-Doppler feature extraction of ballistic targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 602–608. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00607.
- [13] 赵盟盟, 张群, 罗迎, 等. 点迹-曲线关联算法的旋转对称群目标分辨[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(2): 43–48. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.010.
- ZHAO Mengmeng, ZHANG Qun, LUO Ying, *et al.* Distinguishing of rotationally symmetric group targets based on plot-curve association algorithm[J]. *Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition*, 2015, 16(2): 43–48. doi: 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.02.010.
- [14] 赵盟盟, 张群, 陈怡君, 等. 一种用于空间群目标分辨的滑动窗轨迹跟踪算法[J]. 宇航学报, 2015, 36(10): 1187–1194. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.10.013.
- ZHAO Mengmeng, ZHANG Qun, CHEN Yijun, *et al.* A sliding window tracking algorithm for distinguishing space group targets[J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(10): 1187–1194. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.10.013.
- [15] 李飞, 纠博, 邵长宇, 等. 目标微动参数估计的曲线跟踪算法[J]. 电波科学学报, 2013, 28(2): 278–284, 295. doi: 10.13443/j.cjors.2013.02.024.
- LI Fei, JIU Bo, SHAO Changyu, *et al.* Curve tracking based parameter estimation of micro-motion[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2): 278–284, 295. doi: 10.13443/j.cjors.2013.02.024.
- [16] 邵长宇, 杜兰, 李飞, 等. 基于多目标跟踪的空间锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(12): 2972–2977. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00656.
- SHAO Changyu, DU Lan, LI Fei, *et al.* Micro-Doppler extraction from space cone target based on multiple target tracking[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2972–2977. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00656.
- [17] 刘思源. 自适应恒虚警研究与硬件设计[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2014.
- LIU Siyuan. Adaptive CFAR research and hardware logic design[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2014.
- [18] 程禹, 吴限德, 韩华, 等. 基于卡尔曼滤波和RTS事后平滑的GNSS共视时间比对算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(5): 915–920. doi: 10.11990/jheu.201702002.
- CHENG Yu, WU Xiande, HAN Hua, *et al.* GNSS common-view time comparison algorithm based on Kalman filtering and Rauch-Tung-Striebel smoothing[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(5): 915–920. doi: 10.11990/jheu.201702002.
- [19] 曹文杰. 空间锥体目标微多普勒提取与参数估计[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2014.
- CAO Wenjie. Micro-Doppler extraction and parameter estimation of the space cone-shaped target[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2014.
- 魏嘉琪: 女, 1994年生, 博士生, 研究方向为ISAR成像.
- 张磊: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为SAR/ISAR成像与运动补偿.
- 刘宏伟: 男, 1971年生, 教授, 研究方向为宽带雷达信号处理.
- 盛佳恋: 女, 1987年生, 工程师, 研究方向为SAR/ISAR成像, 太赫兹雷达信号处理.