

基于时变三维坐标重构的空间锥体目标 微动特征提取方法

蒋国建¹, 宫志华², 梁 婷¹, 李开明¹, 张 群¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 63850 部队, 吉林白城, 137001)

摘要 针对现有微动特征提取方法在散射系数复时变条件下不适用的问题, 提出了一种基于时变三维坐标重构的微动特征提取方法。首先建立旋转对称空间锥体目标的微动信号模型, 其次通过动态规划进行散射点分离, 对各个散射点相位干涉处理后获得目标的时变三维像, 最后利用高精度的三维坐标重构提取目标的三维微动特征。通过仿真实验在散射系数复时变的情况下进行微动特征提取, 结果显示该方法的微动特征提取精度较传统方法有明显提高, 可以较好地适用于散射系数复时变的情况。

关键词 干涉; 三维微动特征提取; 旋转对称空间目标; 进动

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.02.007

中图分类号 TN957 文献标志码 A 文章编号 1009-3516(2020)02-0047-06

Micro-Motion Feature Extraction for Space Cone Targets Based on Time-Varying Three-Dimensional Image Reconstruction

JIANG Guojian¹, GONG Zhihua², LIANG Ting¹, LI Kaiming¹, ZHANG Qun¹

(1. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Unit 63850, Baicheng 137001, Jilin, China)

Abstract Aimed at the problem that the existing micro-motion feature extraction method is unapplicable under the condition of the scattering coefficient of the complex time-varying, this paper puts forward a kind of micro-motion feature extraction method based on time-varying 3-D image coordinate reconstruction. By the use of this method, firstly, the micro-motion signal model of the rotating symmetric space cone target is established, then the scattering points are separated by dynamic programming to obtain the time-varying three-dimensional image of the target after the phase interference of each scattering point. And finally, the 3-D micro-motion feature of the target is extracted by using high-precision 3-D coordinate reconstruction. The simulation results show that the accuracy of the proposed method is better than that of the traditional method. The proposed method can be well applied to the case of complex time-varying scattering coefficients.

Key words interference; 3-D micro-motion feature extraction; rotation-symmetric space targets; precession

收稿日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61701530); 陕西省自然科学基础研究计划(2020JM-348)

作者简介: 蒋国建(1996—), 男, 浙江东阳人, 硕士生, 主要从事雷达信号处理。E-mail: jiangguojian81@163.com

引用格式: 蒋国建, 宫志华, 梁婷, 等. 基于时变三维坐标重构的空间锥体目标微动特征提取方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(2): 47-52. JIANG Guojian, GONG Zhihua, LIANG Ting, et al. Micro-Motion Feature Extraction for Space Cone Targets Based on Time-varying Three-Dimensional Image Reconstruction[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(2): 47-52.

多天线干涉 ISAR(InISAR)成像技术具有提取目标三维像的能力^[1-3]。在一发两收干涉成像系统中, 目标的回波同时被 2 个接收天线获得, 经过成像处理后得到 2 幅目标的 ISAR 像, 而目标散射分布的高程信息则可由这 2 幅 ISAR 像中相同散射中心的相位差分估计得到^[4-6]。然而, 空间目标除了随质心的平动外, 通常还具有旋转、振动、进动乃至章动等复杂的微动形式^[7], 其对回波信号的调制会使得方位向散焦, 从而导致距离-多普勒(RD)或距离-瞬时多普勒(RID)等 ISAR 成像方法的成像质量下降^[8]。虽然一些基于 Radon-Wigner 变换^[9]、经验模式分解(EMD)^[10]的 ISAR 成像方法能够对简单的微动目标成像^[11], 但是这些方法在成像过程中会破坏干涉处理所需要的相位信息, 因而不能应用于多天线干涉体制中; 此外, 如果目标具有较复杂的微动形式如进动等, 这些成像方法也会失效^[12]。

弹道目标作为空间中一类重要的识别对象, 通常被建模为旋转对称的光滑锥体^[13], 其中如锥体顶点这种固定散射中心在很大的观测角度范围内都是位置不变且显著可见的。与之相反, 在光滑曲面上的滑动散射中心所在的位置则会随着雷达视线方向(LOS)变化^[14]。固定散射中心和滑动散射中心具有不同的非平稳特性。一些参数化方法可以实现基于滑动散射模型的微动目标三维成像^[15-17], 然而, 这些方法大多假定散射系数为常数, 难以适用于散射系数复时变的情况。

本文针对空间锥体目标的微动特征提取问题, 提出了一种基于目标时变三维坐标重构的微动特征提取方法。在分析 L 型三天线观测系统中旋转对称目标信号模型的基础上, 首先完成距离-慢时间域的微动曲线分离, 其次依据干涉相位进行时变的三维坐标重构, 最后通过建立的三维坐标与微动特征之间关系, 实现三维微动特征提取。相比于已有的方法, 本文方法能够较好地适用于散射系数复时变的情况。

1 信号模型

空间锥体目标是一种刚体目标, 见图 1, 其锥顶存在一个固定散射中心 D, 同时锥底和入射波面的交点处会存在滑动散射中心 P 和 Q。当平动补偿完成后, 目标进动由绕对称轴自旋与绕固定轴锥旋叠加组成, 其旋转角速度矢量为 $\omega_c = [\omega_{cU}, \omega_{cV}, \omega_{cW}]$ 。其中 G 轴为锥旋轴, 目标质心 O 为坐标原点, 雷达视线方向 n 与平面 FOG 夹角为 γ , 锥旋轴 G 与对称轴 OD 的角度 ϵ 称为进动角。

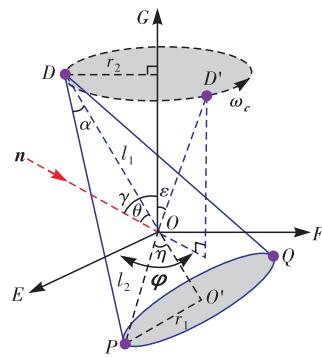


图 1 锥体目标进动几何关系

当散射点 D 在 t_m 后移动到 D' , OD' 在 EOF 平面的投影与 E 轴的夹角 $\varphi = \Omega_c t_m + \varphi_0$, 其中 $\Omega_c = \|\omega_c\|$, φ_0 是初始时刻的夹角。由余弦定理可得散射点 D 到天线 A 的距离为:

$$R_{AD}(t_m) = \sqrt{l_1^2 + R_{AO}^2(t_m) - 2l_1 R_{AO}(t_m) \cos \theta} \quad (1)$$

式中: $l_1 = |OD|$; θ 为雷达视线方向与 OD 的夹角。在远场条件下有 $l_1 \ll R_{AO}(t_m)$, 式(1)可以表示为:

$$R_{AD}(t_m) \approx R_{AO}(t_m) - l_1 \cos \theta \quad (2)$$

由于 $OD = l_1 [\sin \epsilon \cos \varphi, \sin \epsilon \sin \varphi, \cos \epsilon]^T$ 且雷达视线方向 $n = [0, \sin \gamma, \cos \gamma]^T$, 可以得到:

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{OD} \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{OD}| |\mathbf{n}|} = \cos \epsilon \cos \gamma + \sin \epsilon \sin \gamma \sin \varphi \quad (3)$$

式中: \cdot 表示内积。距离 AD 与 AO 的差为 $R_{\Delta AD}$:

$$R_{\Delta AD}(t_m) = R_{AD}(t_m) - R_{AO}(t_m) = -l_1 \cos \epsilon \cos \gamma - l_1 \sin \epsilon \sin \gamma \sin(\Omega_c t_m + \varphi_0) \quad (4)$$

类似的, 散射点 P 到天线 A 的距离表示为:

$$R_{AP}(t_m) = \sqrt{l_2^2 + R_{AO}^2(t_m) + 2l_2 R_{AO}(t_m) \cos(\theta + \eta)} \quad (5)$$

式中: $l_2 = \sqrt{(h - l_1)^2 + r_1^2}$, h 和 r_1 分别是目标的长度和底面半径; η 表示 OP 和 OO' 间的夹角; O' 是 O 在锥底的投影。设距离 AP 与 AO 的差为 $R_{\Delta AP}$, 由于 $l_2 = R_{AO}(t_m)$, $R_{\Delta AP}$ 可以表示为:

$$R_{\Delta AP}(t_m) = l_2 \cos \eta [\cos \epsilon \cos \gamma + \sin \epsilon \sin \gamma \sin(\Omega_c t_m + \varphi_0)] - l_2 \sin \eta \sqrt{1 - [\cos \epsilon \cos \gamma + \sin \epsilon \sin \gamma \sin(\Omega_c t_m + \varphi_0)]^2} \quad (6)$$

散射点 Q 与 P 具有等价性, 在此不再赘述。

L 型三天线干涉成像系统见图 2, 其发射天线位于 A 处, 接收天线分别位于 B、C 处, 基线长度为 L。以 A 为原点, AB、AC 为轴建立全局三维坐标系 $C_g = (X, Y, Z)$; 以目标质心 O 为原点建立与全局坐标系平行的参考坐标系 $C_r = (U, V, W)$; 以目标质心 O 为原点建立目标本地坐标系 $C_i = (x, y, z)$ 。目标相对于雷达的平动速度为 v 。

假设雷达发射线性调频(LFM)信号, A 天线接收到的任意散射点回波信号可以表示为:

$$S_A(t_k, t_m) = \sigma_A \text{rect} \left[\frac{t_k - 2R_A(t_m)/c}{T_p} \right] \cdot$$

$$\exp\left\{2j\pi f_c \left[t_k - \frac{2R_A(t_m)}{c}\right] + j\pi\mu \left[t_k - \frac{2R_A(t_m)}{c}\right]^2\right\} \quad (7)$$

式中: t_k 和 t_m 分别表示快时间和慢时间; c 为电磁波传播速度; T_p 为脉冲宽度; f_c 为载频; μ 为调频率; σ_A 为 A 天线接收到散射点的散射系数; $R_A(t_m)$ 为在 t_m 时刻散射点到天线 A 的斜距。

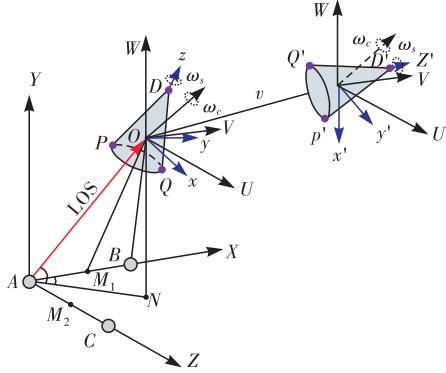


图 2 目标雷达几何关系

2 三维成像及微动特征提取

2.1 坐标重建

以 OB 间的距离为参考距离 $R_{BO}(t_m)$,任意散射点距离脉压后的回波信号在 $f_k \sim t_m$ 域可以表示为:

$$\begin{aligned} S_B(f_k, t_m) &= \sigma_B T_p \cdot \\ &\text{sinc}\left\{T_p\left[f_k + \frac{\mu}{c}(R_{\Delta A}(t_m) + R_{\Delta B}(t_m))\right]\right\} \cdot \\ &\exp\left[-j\frac{2\pi}{c}f_c(R_{\Delta A}(t_m) + R_{\Delta B}(t_m))\right] \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $R_{\Delta B}(t_m) = R_B(t_m) - R_{BO}(t_m)$; $R_B(t_m)$ 为 t_m 时刻散射点到天线 B 的距离; σ_B 表示 B 天线接收到散射点的散射系数。天线 A、B 接收到信号干涉处理得到:

$$\varphi_{AB}(t_m) = \frac{2\pi}{\lambda}[(R_{\Delta A}(t_m) - R_{\Delta B}(t_m))] \quad (9)$$

假设散射点在 C_t 坐标系中的坐标为 (x, y, z) ,由雷达和目标在 t_m 时刻的瞬时几何关系,天线 A 和天线 B 接收到信号的相位差可以进一步表示为:

$$\varphi_{AB} = \frac{2L(X_0 + x) - L^2}{R_A + R_B} - \frac{2LX_0 - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \quad (10)$$

由此可以解得散射点的 x 坐标:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\lambda\varphi_{AB}(R_A + R_B)}{4\pi L} + \\ &\frac{(2X_0 - L)(R_{AO} + R_{BO} - R_{AO} - R_{BO})}{2(R_{AO} + R_{BO})} \end{aligned} \quad (11)$$

在远场条件下有 $R_A \approx R_B \approx R_{BO} \approx R_{AO} \approx R_0$, 则 x 坐标可以进一步表示为:

$$x = \lambda\varphi_{AB}R_0/2\pi L \quad (12)$$

对称的可以得到 z 坐标:

$$z = \lambda\varphi_{AC}R_0/2\pi L \quad (13)$$

式中: φ_{AC} 为天线 A 和天线 C 接收到信号的相位差。为了避免卷绕, φ_{AB} 与 φ_{AC} 必须在 $[-\pi, \pi]$ 内, 因此目标的最大尺寸必须满足:

$$x, z \in \left[-\frac{\lambda R_0}{2L}, \frac{\lambda R_0}{2L}\right] \quad (14)$$

在远场小目标的情况下,通常如上约束是满足的。例如,在目标雷达距离 500 km、基线长度 100 m、波长 0.03 m 时,目标尺寸范围是 $[-75, 75]$ m, 显然绝大多数人造空间目标均在此范围内。

2.2 散射点分离

由于雷达回波信号中包含目标上所有散射点的子回波,因此在坐标重构之前需要在不破坏相位的前提下将不同散射点的信号进行分离。本节提出一种动态规划算法来实现微动曲线分离。以天线 A 接收到信号为例:

$$S_A(n_i, m_j) = \{(n_i, m_j) | i \in [1, N], j \in [1, M]\} \quad (15)$$

式中: M 和 N 分别表示频率和慢时间采样点数。为了提高分离效果,首先需要设定阈值 ξ 以消除杂波和旁瓣造成的不利影响,阈值定义为:

$$\xi = \kappa \max\{|S_A(n_i, m_j)|\} \quad (16)$$

式中: $\kappa \in (0, 1)$ 是由实际情况决定的阈值系数。以阈值 ξ 滤波后的距离-慢时间像为:

$$S_A(n_i, m_j) = \begin{cases} |S_A(n_i, m_j)|, & |S_A(n_i, m_j)| \geq \xi \\ 0, & |S_A(n_i, m_j)| < \xi \end{cases} \quad (17)$$

由于微动曲线连续缓变,曲线上相邻两点之间的导数差应当最小,据此可以建立动态规划模型:

$$\begin{aligned} f(n_i, m_j) &= \min\left\{\sum_{i=k+2}^N \left|\frac{n_i - n_{i-1}}{m_j - m_{j-1}} - \frac{n_{i-1} - n_{i-1-k}}{m_{j-1} - m_{j-1-k}}\right|\right\} \\ \text{s. t. } m_j - m_{j-1} &> 0, n_i \in \mathbb{N}, m_j \in \mathbb{N} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: k 是预先设定的一个较小整数; $m_i - m_{i-1} > 0$ 是单向搜索约束。当目标函数最小时,微动曲线 $f(n_i, m_j)$ 就被提取出来。另外,还需采用 clean 的方法来避免不同散射点对应的曲线之间的干扰,即每当提取出一条微动曲线后,将其从 $S_A(n_i, m_j)$ 中删除。在整个搜索过程中,当 $(n_{i-1} - n_{i-2})/(m_{j-1} - m_{j-2}) = 0$ 时表示微动曲线此时不再连续,需要 $(n_{i-1} - n_{i-1-k})/(m_{j-1} - m_{j-1-k})$ 替代 $(n_{i-1} - n_{i-2})/(m_{j-1} - m_{j-2}) = 0$ 来避免算法终止。利用分离后的曲线进行干涉处理即可得到每个散射点的瞬时二维坐标。

2.3 微动特征提取

通过动态规划,在距离-慢时间像中混叠的微动曲线已经分离开来。从图 1 可以看出,由于滑动散射点 P 和 Q 是入射平面和锥底边缘的交点, PQ 是锥底过 O' 点的一条直径。设点 P 和 Q 在 t_1 时刻

的坐标分别为 $[x_P(t_1), y_P(t_1), z_P(t_1)]$ 和 $[x_Q(t_1), y_Q(t_1), z_Q(t_1)]$, 则锥体底面半径为:

$$r_1 = \frac{1}{2} \| \mathbf{PQ} \| = \frac{1}{2} \| [x_P, y_P, z_P] - [x_Q, y_Q, z_Q] \| \quad (19)$$

同时, 锥底圆心坐标可以表示为:

$$\begin{aligned} [x_O(t_1), y_O(t_1), z_O(t_1)] &= \frac{1}{2} \{ [x_P(t_1), \\ y_P(t_1), z_P(t_1)] + [x_Q(t_1), y_Q(t_1), z_Q(t_1)] \} \end{aligned} \quad (20)$$

锥体自旋对称轴向量 $\mathbf{O'D}$ 可以表示为:

$$\mathbf{O'D} = [x_O, y_O, z_O] - [x_D, y_D, z_D] \quad (21)$$

式中: $[x_D(t_1), y_D(t_1), z_D(t_1)]$ 是散射点 D 在 t_1 时刻的坐标。此外, 目标的半锥角可以表示为:

$$\begin{aligned} \alpha &= \arcsin \frac{\| \mathbf{DP} \times \mathbf{O'D} \|}{\| \mathbf{DP} \| \| \mathbf{O'D} \|} = \\ \arccos \frac{\mathbf{DP} \cdot \mathbf{O'D}}{\| \mathbf{DP} \| \| \mathbf{O'D} \|} \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $\| \mathbf{O'D} \|$ 是目标长度; \times 表示外积运算。

对于固定散射点 D 而言, 如图 1 所示, 其运动轨迹是一个以 r_2 为半径的圆, 假设 D 经过半个周期运动到 D' , 那么 $\| \mathbf{DD}' \|$ 就是运动圆迹的直径, 因此 r_2 可以表示为:

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{1}{2} \| \mathbf{DD}' \| = \frac{1}{2} \| [x_D(t_1), y_D(t_1), z_D(t_1)] - \\ [x_D(t_1 + \frac{T_c}{2}), y_D(t_1 + \frac{T_c}{2}), z_D(t_1 + \frac{T_c}{2})] \| \end{aligned} \quad (23)$$

由固定散射点 D 的运动关系, 进动角可以表示为:

$$\epsilon = \arccos \frac{\mathbf{OD} \cdot \boldsymbol{\omega}_c}{\| \mathbf{OD} \| \| \boldsymbol{\omega}_c \|} \quad (24)$$

当进动角 ϵ 已知时, 关于旋转角速度矢量的等式可以建立如下:

$$\begin{aligned} F(\omega_{cU}, \omega_{cV}, \omega_{cW}) &= [x_D(t_i), y_D(t_i), z_D(t_i)] \begin{bmatrix} \omega_{cU} \\ \omega_{cV} \\ \omega_{cW} \end{bmatrix} - \\ \Omega_c \| \mathbf{OD} \| \cos \epsilon \end{aligned} \quad (25)$$

式中: $i \in [1, N]$ 。根据上式, 旋转角速度 $\boldsymbol{\omega}_c$ 可以通过任意 3 个不同时刻的 \mathbf{OD} 联立求解。

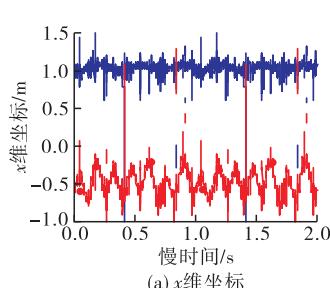
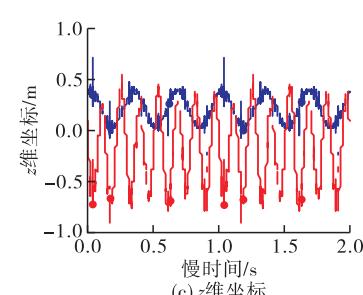
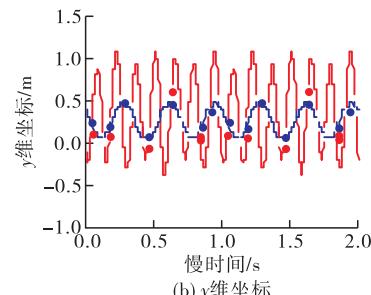


图 4 三维坐标重构结果



3 仿真分析

3.1 目标散射系数不变

仿真参数为: 载频 $f_c = 20.5$ GHz, 带宽 $B = 3$ GHz, 脉冲宽度 $T_p = 50$ μ s, 脉冲重复频率 PRF = 1 000 Hz。雷达照射目标时长 2 s。在全局参考系 C_Q 下目标初始位置为 (0, 500, 0) km, 基线长度为 $L = 200$ m。自旋角速度和锥旋角速度分别为 $\Omega_s = 8\pi$ rad/s 和 $\Omega_c = 6\pi$ rad/s, 进动角为 $\frac{\pi}{18}$ rad。初始时刻锥顶散射点与锥底散射点在目标本地坐标系中的位置分别为 (0, 1, 0) m 与 (0.5, -0.5, 0) m。无噪条件下的仿真结果见图 3~5。图 3(a) 和 3(b) 分别是天线 A 和 B 的距离-慢时间像。在散射点分离和干涉处理后, 每一慢时间的三维坐标重构结果见图 4。由于多个散射点的微动曲线存在交点, 图 4(a) 和 (c) 的重构结果中可以看到明显的波动和断点; 而图 4(b) 的重构结果较为平滑, 是因为 y 坐标是通过距离慢时间像定标求得的。将图 4 中的波动和断点进行平滑处理后, 其结果与真实坐标对比如图 5, 可以看出恢复的三维坐标与真实值基本一致。所提取的微动特征及其误差见表 1, 证明该方法能够获得高精度的微动特征提取结果。

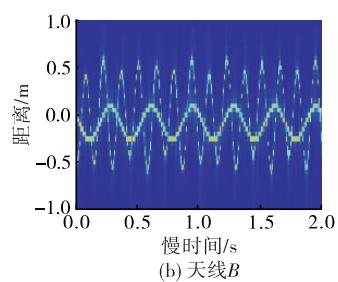
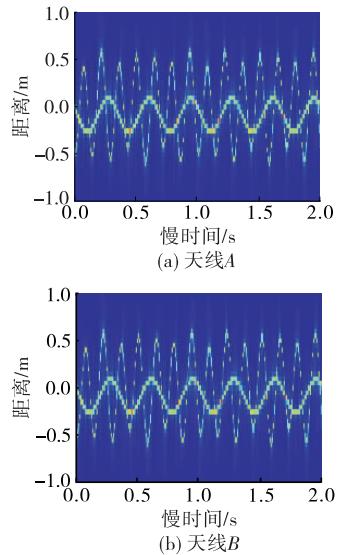


图 3 天线 A 和 B 的距离-慢时间像

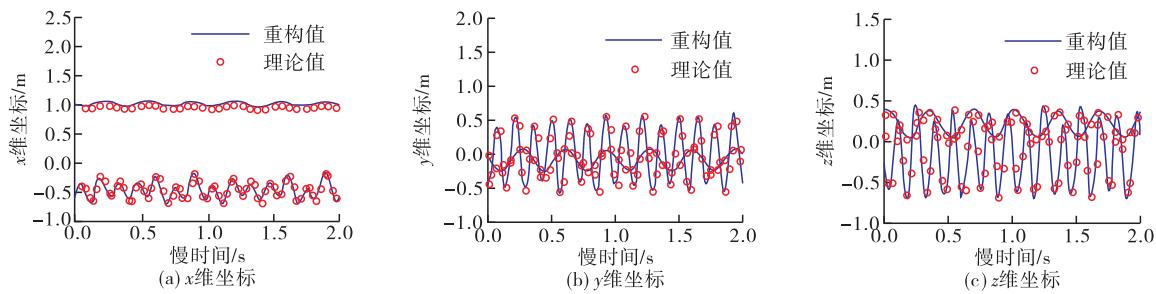


图 5 三维坐标重构结果与真实值对比

表 1 散射系数不变的微动特征提取结果及误差

参数	真实值	估计值	误差
进动周期 T_c/s	0.250 0	0.250 0	0.000 0
进动角 ϵ/rad	0.174 5	0.174 4	0.000 1
半锥角 α/rad	0.380 5	0.371 1	0.009 4
目标长度 h/m	2.500 0	2.574 5	0.074 5
锥底半径 r_1/m	1.000 0	1.026 0	0.026 0
角速度矢量 $\omega_c/(rad \cdot s^{-1})$	[8.481 6, 8.714 3, 10.174 1]	[8.827 4, 8.014 7, 10.812 4]	1.008 2

3.2 目标散射系数复时变

散射系数为 $\sigma(t_m) = [0.5 + 0.5\sin(2\pi\Omega_s t_m)]\exp[j\sin(2\pi\Omega_c t_m)]$, 载频 $f_c = 15.5$ GHz, 自旋角速度和锥旋角速度分别为 $\Omega_s = 10\pi$ rad/s 和 $\Omega_c = 8\pi$ rad/s, 进动角为 π rad/18。目标本地系 C_t 下锥顶初始坐标为(0,0,1.5)m。散射系数复时变条件下的仿真结果见图 6~8。天线 A 接收信号的距离-慢时间像见图 6(a), 可以看出因为复时变散射系数的能量在慢时间中分布不均匀, 导致微动曲线已经不再连续。文献[18]采用的 Viterbi 方法遇到断点则无法处理, 无法应对这种散射系数复时变的情况。由于所提动态规划算法考虑到了曲线不连续时的情况, 如图 6(b)所示各个散射点对应的微动曲线依然可以稳定分离。

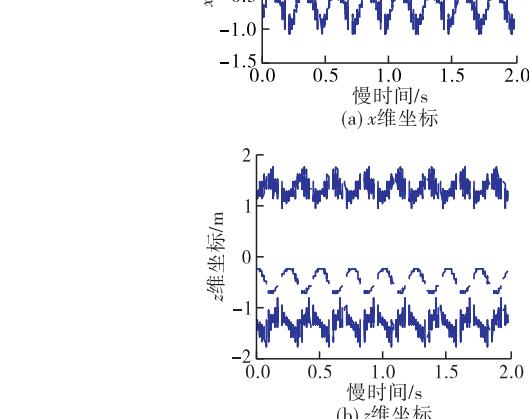


图 6 天线 A 的仿真结果

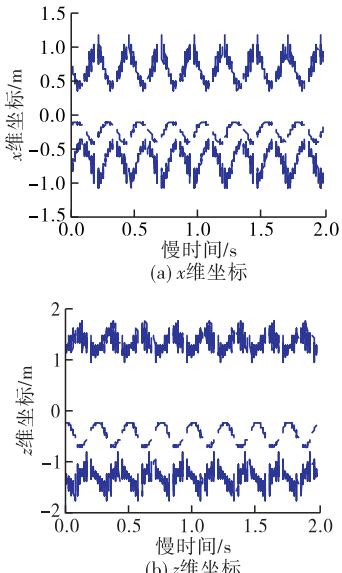
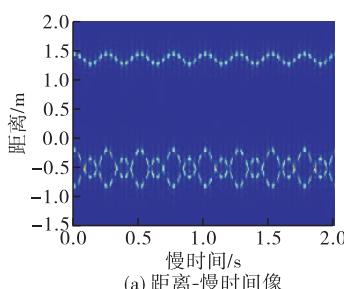
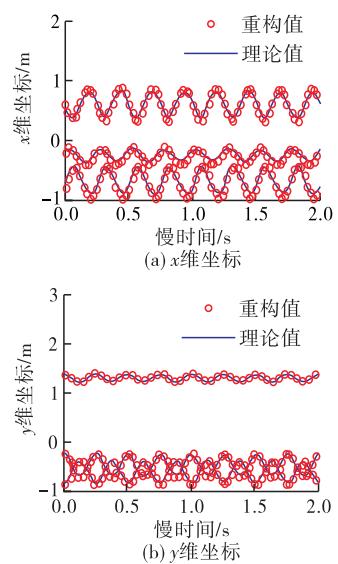


图 7 坐标重构



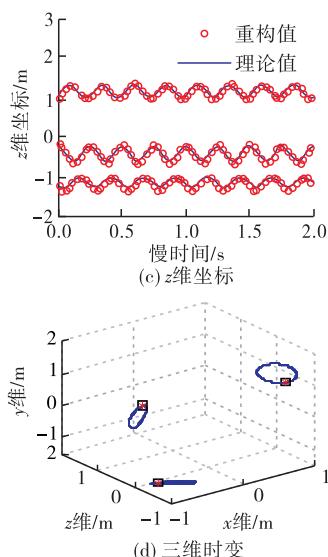


图 8 重构坐标与真实坐标对比

表 2 散射系数复时变的微动特征提取结果及误差

参数	真实值	估计值	误差
进动周期 ϵ/s	0.250 0	0.250 0	0.000 0
进动角 α/rad	0.174 5	0.174 0	0.000 5
半锥角 ϵ/rad	0.380 5	0.424 6	0.044 1
目标长度 h/m	2.500 0	2.573 4	0.073 4
锥底半径 r_1/m	1.000 0	1.026 4	0.026 4
角速度矢量 $\omega_c/(rad \cdot s^{-1})$	[10.481 6, 10.714 3, 20.174 1]	[10.827 1, 10.009 9, 20.814 6]	1.012 8

4 结语

本文基于 InISAR 中多天线干涉处理的思路, 提出了一种针对空间锥体目标进动条件下的三维成像及微动特征提取方法。相比于已有的方法, 该方法能够适用于散射系数复时变的情况, 但其是一种基于图像域曲线分离方法, 当目标存在散射中心数目较多时, 曲线分离的效果不佳, 这一问题是图像域处理的固有问题, 采用信号域的多分量微动信号分离方法或许有望解决。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Q, MA C Z, ZHANG T, et al. Research on Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar 3-D Imaging [J]. Electron Inform Technol, 2003, 23: 890-898.
- [2] ZHANG Q, TAT S Y, DU G, et al. Estimation of Three-Dimensional Motion Parameters in Interferometric ISAR Imaging[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(2): 292-300.
- [3] XU X J, NARAYANAN R M. Three-Dimensional Interferometric ISAR Imaging for Target Scattering Di-

agnosis and Modeling[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(7): 1094-1102.

- [4] 毕严先, 魏少明, 王俊, 等. 基于最小二乘估计的 InISAR 空间目标三维成像方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5): 1079-1084.
- [5] 刘承兰. 干涉逆合成孔径雷达 (InISAR) 三维成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [6] 赵莉芝. 空间目标干涉三维 ISAR 成像技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [7] 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.
- [8] 惠叶, 白雪茹. 基于 RID 序列的微动目标高分辨三维成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 548-556.
- [9] WANG Q. High-Resolution Three-Dimensional Radar Imaging for Rapidly Spinning Targets[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(1): 22-30.
- [10] LI W. Scaled Radon-Wigner Transform Imaging and Scaling of Maneuvering Target[J]. IEEE Trans Aerosp Electr Syst, 2010, 46(4): 2043-2051.
- [11] BAI X. Imaging of Micromotion Targets with Rotating parts Based on Empirical-Mode Decomposition[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2008, 46(11): 3514-3523.
- [12] 张龙, 张磊, 邢孟道. 一种基于改进压缩感知的低信噪比 ISAR 高分辨成像方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2263-2267.
- [13] LIU Y, LI N, WANG R, et al. Achieving High-Quality Three-Dimensional InISAR Imageries of Maneuvering Target via Super-Resolution ISAR Imaging by Exploiting Sparseness[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 828-832.
- [14] POTTER L, CHIANG D, CARRIERE R, et al. A GTD Based Parametric Model for Radar Scattering[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1995, 43(10): 1058-1067.
- [15] BAI X, BAO Z. High-Resolution 3D Imaging of Precession Cone-Shaped Targets[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 2014, 62(8): 4209-4219.
- [16] GAO H, XIE L, WEN S, et al. Micro-Doppler Signature Extraction from Ballistic Target Withmicro-Motions[J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2010, 46(4): 1969-1982.
- [17] BAI X, BAO Z. Imaging of Rotation-Symmetric Space Targets Based on Electromagnetic Modeling [J]. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2014, 50(3): 1680-1689.
- [18] LIU Y, SONG M, WU K, et al. High-Quality 3-D InISAR Imaging of Maneuvering Target Based on a Combined Processing Approach[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(5): 1036-1040.
- [19] JIAN H, QUN Z, YING L, et al. Three-Dimensional Interferometric Imaging and Precession Feature Extraction of Space Targets in Wideband Radar[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12(1): 016029.

(编辑:徐敏)