

一种空间微动目标宽带雷达干涉三维成像方法

陈春晖 张群* 罗迎 孙玉雪
(空军工程大学信息与导航学院 西安 710077)
(信息感知技术协同创新中心 西安 710077)

摘要: 空间微动目标3维成像在目标特征信息感知方面具有优势,对于实施空间目标成像、分类、识别等任务具有重要意义。据此,该文针对L型天线阵列成像系统,提出一种基于改进的粒子群优化的空间微动目标宽带雷达干涉式3维成像方法。首先,分析了目标回波信号的微多普勒特性,建立参数化表征模型。其次,基于所提优化算法重构各天线回波信号的微多普勒相位项,通过对各回波信号相位项的干涉处理,获得干涉相位差,并推导干涉相位差与目标空间坐标的关系,从而重构真实3维坐标,获得微动目标3维图像。相较于已有方法,所提方法基于干涉式成像思想,在无遮挡和有遮挡效应的条件下,均可重构微动目标真实空间坐标和3维图像,并且具有较好的鲁棒性。最后,仿真计算验证了该方法的有效性。

关键词: 雷达信号处理; 3维成像; 干涉成像; 微动目标; 微多普勒效应

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3144-08

DOI: 10.11999/JEIT161025

Interferometric Three Dimensional Imaging Method for Space Micro-motion Target Based on Wideband Radar

CHEN Chunhui ZHANG Qun LUO Ying SUN Yuxue

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

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China)

Abstract: Three dimensional imaging of space micro-motion target has significant advantages on target information awareness, which is crucial to effectively realize space target imaging, classification and recognition. In this paper, through the L type antenna array imaging system, an interferometric three dimensional imaging method for space micro-motion target is proposed based on the improved Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. Firstly, the Doppler effect in the received signal is analyzed, and the corresponding parametric model is established. Then, the Doppler phase term of the received signal is reconstructed by using the proposed optimization method. Through interferometric processing and analyzing the quantitative relationship between interferometric phase difference and real coordinate, the three dimensional coordinates and image can be obtained. Compared with the existing methods, the proposed method can reconstruct the real coordinates and three dimensional image of micro-motion target with and without occlusion effect. It also has good robustness. Finally, simulations validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: Radar signal processing; Three dimensional imaging; Interferometric imaging; Micro-motion target; Micro-Doppler effect

1 引言

随着航空航天技术的不断发展,各类空间目标的数量急剧增加,如何有效实现对空间目标的探测、跟踪、成像与识别等引起了广泛关注。空间目标,

如弹道导弹、太空碎片等,通常具有自旋、锥旋和进动等多种微动形式,在雷达回波信号中产生微多普勒效应^[1,2]。据此开展对空间微动目标成像方面的研究,对于保障我国空间安全等具有重要现实意义^[3]。

在对空间微动目标成像的研究中,相较于采用逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)实现目标2维成像^[4],3维成像在对目标外形、体积、微动参数等信息的感知方面具有显著优势^[5]。对于基于单基雷达的运动目标3维成像方法^[6,7],由

收稿日期: 2016-10-08; 改回日期: 2016-11-17; 网络出版: 2016-12-14

*通信作者: 张群 afeuzq@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571457)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61571457)

于仅能观测到目标在雷达径向距离上的微动分量，因此，获得的 3 维成像结果，不能确定目标的真实空间位置，需要利用目标相对于雷达的姿态信息，才能实现 3 维成像结果的准确定标。对于基于双/多基地雷达的运动目标 3 维成像方法^[8,9]，目标散射中心各向异性、遮挡效应等情况，将增加各雷达回波信号联合处理的复杂性。此外，由于需要同时对多部雷达的回波信号进行联合处理，系统的实现也较复杂。近年来，将干涉技术与 ISAR 成像相结合，组成干涉成像系统，为实现运动目标的 3 维成像提供了新途径，比如基于 L 型阵列天线的干涉式成像系统。由已有文献^[10-13]的研究结果可知，对于惰性刚体运动目标，通过干涉式成像技术获得目标 3 维图像，具有与目标的物理尺寸相一致，能够有效反映不受运动姿态影响的目标稳健特征信息等优势，可为空间目标分类、识别等提供有力的信息支撑。

在已有文献的研究中，鲜有将干涉式成像方法用于实现空间微动目标 3 维成像，基于干涉式成像方法在 3 维成像研究中的优势，本文将干涉成像的思想引入对空间微动目标 3 维成像的研究工作中。对于空间微动目标，受限于雷达系统的脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)，在 ISAR 成像所需小转角内的有效回波数量往往较少，使得传统的 ISAR 成像效果不理想，无法有效区分各目标散射点，从而影响干涉处理，因此，已有的干涉式成像方法无法直接用于实现空间微动目标 3 维成像。针对该问题，充分利用宽带信号条件下由目标微动所引起的回波信号调制特征差异，从而区分各散射点的回波信号，进行有效的干涉处理。以空间自旋目标为例，基于 L 型天线阵列成像系统，提出了一种基于改进的粒子群优化的空间微动目标宽带雷达干涉式 3 维成像方法，有效克服了单基雷达 3 维成像中难以获得目标真实空间坐标和双/多基地雷达 3 维成像中多部雷达回波信号联合处理复杂等问题。

2 微动目标回波信号模型

基于 L 型天线阵列干涉式成像系统如图 1 中所示，坐标系 UVW 为雷达坐标系，收发一体天线 A 位于坐标原点 $O(0, 0, 0)$ 处。天线 A 和接收天线 B, C 构成两对分别沿着 U 轴和 V 轴方向的相互垂直的干涉基线，基线长度为 L 。接收天线 B 和 C 分别位于 $(L, 0, 0)$ 和 $(0, 0, L)$ 处。坐标系 XYZ 为参考坐标系，平行于雷达坐标系，在目标运动的起始时刻，坐标原点 o 在雷达坐标系中的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ，其

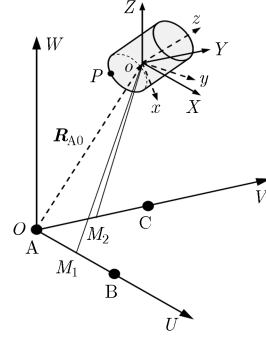


图 1 干涉式成像系统及目标模型

方位角和仰角分别为 α 和 β ， o 点到天线 A 的位移矢量为 \mathbf{R}_{A0} 。坐标系 xyz 为目标本地坐标系，其原点与参考坐标系相同，为目标中心 o 。空间自旋目标平动速度为 \mathbf{v} ，以角速度 ω_x 、 ω_y 和 ω_z 绕 x 轴、 y 轴和 z 轴做旋转运动，其在目标本地坐标系中的角速度矢量为 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ ，其在参考坐标系中的角速度矢量为 $\hat{\boldsymbol{\omega}} = (\omega_X, \omega_Y, \omega_Z)^T$ 。假设点 P 为目标上的一个散射点，在起始时刻，在目标本地坐标系中的位置矢量为 $\mathbf{r}_0 = (r_{x0}, r_{y0}, r_{z0})^T$ ，在参考坐标系中的位置矢量为 $\hat{\mathbf{r}}_0 = (r_{X0}, r_{Y0}, r_{Z0})^T$ 。目标本地坐标系和参考坐标系之间的关系为 $\hat{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{R}_{\text{mit}} \boldsymbol{\omega}$ ， $\hat{\mathbf{r}}_0 = \mathbf{R}_{\text{mit}} \mathbf{r}_0$ ，其中， \mathbf{R}_{mit} 为欧拉旋转矩阵^[14]。

雷达发射线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 信号为

$$s_i(\hat{t}, t_m) = \text{rect}(\hat{t}/T_p) \cdot \exp\left\{j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right\} \quad (1)$$

其中， $\text{rect}(\hat{t}/T_p) = \begin{cases} 1, & -T_p/2 \leq \hat{t} \leq T_p/2 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ 。在式(1)

中， f_c 为中心频率， μ 为调频率， T_p 为脉宽， \hat{t} 为快时间， t_m 为慢时间。 $\hat{t} = t - t_m = t - mT$ ，其中， $m = 0, 2, \dots, M-1$ ， m 为脉冲序号， M 为雷达发射信号总脉冲数量， T 为脉冲重复时间。假设目标上有 K 个散射点，对第 $k(k = 1, 2, \dots, K)$ 个散射点 P ，对天线 A 接收的回波信号进行 dechirp 处理后，对 \hat{t} 做傅里叶变换，并去除剩余视频相位项和包络斜置项，可得回波信号在快时间频率域的表达式为

$$S'_{Ad}(f, t_m) = \sigma_k T_p \text{sinc}\left(T_p\left(f + \frac{2\mu}{c} R_{\Delta Ak}(t_m)\right)\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{c} f_c R_{\Delta Ak}(t_m)\right] \quad (2)$$

其中， σ_k 为第 k 个散射点的散射系数， $R_{\Delta Ak}(t_m) = R_{Ak}(t_m) - R_{A \text{ref}}(t_m)$ ， $R_{Ak}(t_m)$ 为在 t_m 时刻，第 k 个散射点到天线 A 的距离， $R_{A \text{ref}}(t_m)$ 为参考距离。对于天线 B 和 C，对回波信号分别进行相同的处理后，可得到类似的第 k 个散射点回波信号在快时间频率

域的回波信号 $S'_{Bd}(f, t_m)$ 和 $S'_{Cd}(f, t_m)$ 。从以上分析可知, 对于第 k 个散射点, 天线 A, B 和 C 的回波信号在快时间频率域受到 $R_{\Delta Ak}(t_m)$, $R_{\Delta Bk}(t_m)$ 和 $R_{\Delta Ck}(t_m)$ 的调制, 导致回波信号在慢时间域产生了微多普勒效应, 其中, $R_{\Delta Bk}(t_m) = R_{Bk}(t_m) - R_{B \text{ ref}}(t_m)$, $R_{\Delta Ck}(t_m) = R_{Ck}(t_m) - R_{C \text{ ref}}(t_m)$, $R_{Bk}(t_m)$ 和 $R_{Ck}(t_m)$ 分别为在 t_m 时刻, 第 k 个散射点到天线 B 和 C 的距离, $R_{B \text{ ref}}(t_m)$ 和 $R_{C \text{ ref}}(t_m)$ 为参考距离。并且, 在快时间频率-慢时间域, 距离像峰值为随 $R_{\Delta Ak}(t_m)$, $R_{\Delta Bk}(t_m)$ 和 $R_{\Delta Ck}(t_m)$ 变化的曲线。将第 k 个散射点的空间旋转运动及其与雷达之间的空间几何关系投影到其运动轨迹所在平面, 可得几何关系如图 2 所示。

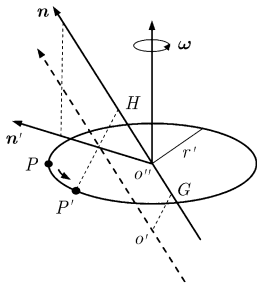


图 2 第 k 个散射点空间旋转运动及其与雷达之间的空间几何关系投影图

在图 2 中, o'' 为散射点运动形成的圆形轨迹的圆心, r' 为圆形的半径, o' 为目标运动后的本地坐标系原点, G 为 o' 在 LOS 上的投影位置。假设在 t_m 时刻, 第 k 个散射点从 P 点处运动至 P' 点处, P' 在 LOS 上的投影为 H , \mathbf{n}' 为 \mathbf{n} 在该平面上的投影向量。以天线 A 为例, 对于自旋运动目标, 由此分析可得 $R_{\Delta Ak}(t_m)$ 的解析表达式为

$$\begin{aligned} R_{\Delta Ak}(t_m) &= \|\mathbf{Go}''\|_{Ak} + r' \cos(\Omega t_m + \theta_{Ak}) \sin \varepsilon_{Ak} \\ &= d_{Ak} + r_{Ak} \cos(\Omega t_m + \theta_{Ak}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, θ_{Ak} 为初相, ε_{Ak} 为 \mathbf{n}_A 与 $\boldsymbol{\omega}$ 之间的夹角, \mathbf{n}_A 为对于天线 A, 沿 LOS 的矢量。由式(3)可知, 对于空间自旋目标, 其在距离-慢时间域的距离像峰值具有余弦变化特征, 可由式(3)进行参数化表示。对于天线 B 和 C, 进行相同的处理, 可分别得到类似的参数化结果 $R_{\Delta Bk}(t_m)$ 和 $R_{\Delta Ck}(t_m)$ 。

干涉式成像方法常用于对非合作运动目标进行 3 维成像, 对于目标分类和识别等具有重要意义。在已有研究中, 鲜有将干涉式成像方法用于实现微动目标 3 维成像。本文将干涉式成像思想用于空间微动目标 3 维成像。基于干涉式成像思想, 对第 k 个散射点, 将天线 A, B 和 C 在距离-慢时间域的回波信号进行干涉处理, 可得到干涉相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{kAB}(t_m) &= \text{Angle}(S'_{Ad}(f, t_m) \cdot S'_{Bd}(f, t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\Delta Ak}(t_m) - R_{\Delta Bk}(t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} R_{\Delta kAB}(t_m) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{kAC}(t_m) &= \text{Angle}(S'_{Ad}(f, t_m) \cdot S'_{Cd}(f, t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\Delta Ak}(t_m) - R_{\Delta Ck}(t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} R_{\Delta kAC}(t_m) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $\text{Angle}(\cdot)$ 表示取复数相位。得到第 k 个散射点对于不同天线的干涉相位差后, 可重构其在参考坐标系 X 轴和 Y 轴的坐标位置分别为

$$\begin{aligned} x_k(t_m) &= \left(\frac{\Delta\varphi_{kAB}(t_m)\lambda}{2\pi L} + \frac{2x_0 - L}{R_{Ao} - R_{Bo}} \right) \\ &\quad \cdot 2R_{oM1} + L/2 - X_0 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} y_k(t_m) &= \left(\frac{\Delta\varphi_{kAC}(t_m)\lambda}{2\pi L} + \frac{2z_0 - L}{R_{Ao} - R_{Co}} \right) \\ &\quad \cdot 2R_{oM2} + L/2 - Y_0 \end{aligned} \quad (7)$$

其在参考坐标系 Z 轴的坐标位置, 可直接对距离-慢时间像进行处理后获得, 具体方法在第 3.2 节中进行分析。由此, 在远场条件下, 可获得 t_m 时刻, 第 k 个散射点在参考坐标系中的真实坐标。对目标上所有强散射点进行干涉式成像处理后, 即可获得空间微动目标的 3 维图像。

3 干涉式 3 维成像方法

3.1 改进的单纯形粒子群优化算法

由式(6), 式(7)可知, 干涉式成像方法是通过不同天线之间的干涉相位差获得目标在参考坐标系中的真实坐标位置, 因此, 准确重构目标在参考坐标系中的真实坐标与获得干涉相位差关系密切, 如何有效获得干涉相位信息成为实现干涉式 3 维成像的关键。已有的微动目标参数估计方法^[15], 比如利用 Hough 变换方法提取微动目标参数^[16], 并不适用于对干涉相位信息的处理。为了有效获取干涉相位信息, 本文提出一种改进的单纯形粒子群算法, 对目标的特征参数进行估计, 从而重构目标干涉相位信息, 实现空间微动目标 3 维成像。

将收缩因子引入粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)算法, 形成带收缩因子的 PSO 算法(Constriction Factor PSO, CFPSO), 可对 a , c_1 , c_2 的取值进行选择, 参数 a 的引入平衡了群体的搜索能力和探索能力。在原有更新原则的基础上乘一个收缩因子 a , 其更新规则为

$$v_{id}^{(l+1)} = av_{id}^{(l)} + c_1 \cdot \text{rand}_1(\cdot) (p_{id}^{(l)} - u_{id}^{(l)}) + c_2 \cdot \text{rand}_2(\cdot) (p_{gd}^{(l)} - u_{id}^{(l)}) \quad (8)$$

$$u_{id}^{(l+1)} = u_{id}^{(l)} + v_{id}^{(l+1)} \quad (9)$$

其中, $a = 1 / \left| 2 - \varphi - (\varphi^2 - 4\varphi)^{1/2} \right|$, $\text{rand}_1(\cdot)$ 和 $\text{rand}_2(\cdot)$ 为区间[0-1]上的两个随机函数, $\varphi = c_1 + c_2$, $\varphi > 4$ 。CFPSO 算法中, 粒子迭代过程中, 由于粒子不断向全局最优解靠拢, 当粒子 i 的位置接近全局最优位置 $p_{gd}^{(l)}$ 时, 其自身经历的最优位置 $p_{id}^{(l)}$ 也接近 $p_{gd}^{(l)}$, 因此式(8)后两项的和就接近于 0, 如果此时粒子速度 $v_{id}^{(l)}$ 也接近于 0, 群体多样性会逐渐减低, 粒子的位置就得不到有效更新, 群体将陷入局部极值点, 从而失去拓展新区域的能力, 出现停滞现象。因此, 在此基础上, 对 CFPSO 算法进行改进, 引入位置因子 γ ($\gamma \geq 0$), 测试粒子的当前位置与全局最优粒子的距离 $d = \|u_{id}^{(l)} - p_{gd}^{(l)}\|_2$, 以及速度因子 α ($\alpha \geq 0$), 判断粒子的飞行速度, 一旦粒子非常接近 $p_{gd}^{(l)}$, 即 $d < \gamma$, 并且它的飞行速度小于设定的 α , 即 $|v_{id}^{(l)}| < \alpha$, 则认为该粒子飞行出现停滞, 对该粒子的位置进行初始化, 从而达到增强粒子运动活力, 保持粒子多样性的目的, 使算法在具有全局优化能力的同时, 有效避免陷入局部极值的问题。

3.2 干涉式 3 维成像算法

以第 k 个散射点为例, 干涉式 3 维成像算法具体步骤如下:

步骤 1 对天线 A, B 和 C 回波信号分别进行处理, 获得 S'_{Ad} , S'_{Bd} 和 S'_{Cd} ;

步骤 2 对回波信号的距离-慢时间像, 利用数学形态学中的骨架提取算法进行处理;

步骤 3 根据骨架提取算法得到的结果, 取第 t_m 时刻的回波信号 $S'_{Ad}(t_m)$, $S'_{Bd}(t_m)$ 和 $S'_{Cd}(t_m)$;

步骤 4 利用基于复图像的 OMP 算法对 $S'_{Ad}(t_m)$, $S'_{Bd}(t_m)$ 和 $S'_{Cd}(t_m)$ 进行分解, 获得各参数的粗估计值, 确定各参数的估计区间;

步骤 5 利用改进的单纯形粒子群算法分别估计第 k 个散射点的参数 d_{Ak} , d_{Bk} , d_{Ck} , r_{Ak} , r_{Bk} , r_{Ck} , Ω , θ_{Ak} , θ_{Bk} , θ_{Ck} ;

步骤 6 由估计得到的参数重构 $R_{\Delta Ak}$, $R_{\Delta Bk}$ 和 $R_{\Delta Ck}$;

步骤 7 根据式(4), 式(5)进行干涉处理, 计算干涉相位差 $\Delta\varphi_{kAB}$ 和 $\Delta\varphi_{kAC}$;

步骤 8 根据式(6), 式(7)计算第 k 个散射点在参考坐标系 X 轴和 Y 轴的坐标位置 x_k 和 y_k ;

步骤 9 由 1 维距离像获得第 k 个散射点在参考坐标系 Z 轴的坐标位置 z_k ;

步骤 10 根据获得的第 k 个散射点在参考坐标系中的坐标 (x_k, y_k, z_k) 重构 3 维图像。

对于目标上的 K 个散射点, 可同时重构其在参考坐标系中的坐标 (x_k, y_k, z_k) , $k = 1, 2, \dots, K$, 从而获得目标 3 维图像。

4 仿真实验与分析

4.1 仿真实验

雷达发射 LFM 信号, 中心频率 f_c 为 10 GHz, 带宽 B 为 300 MHz, 成像时间为 1 s, 脉冲重复频率 PRF 为 1000 Hz, 脉宽 T_p 为 10^{-6} s, 调频率 μ 为 3×10^{14} s $^{-2}$ 。径向距离分辨率为 0.5 m, 横向距离分辨率为 0.5 m。基线长度 L 为 200 m, 天线 A, B 和 C 在雷达坐标系中的坐标分别为(0, 0, 0) m, (200, 0, 0) m 和(0, 0, 200) m。在初始时刻, 目标与雷达距离为 500 km, 3 个散射点的旋转中心在参考坐标系中的坐标分别为(0, 5.000, 0) m, (0, 2.000, 0) m 和(0, -5.000, 0) m, 旋转角速度矢量为 $\hat{\omega} = (0, 4\pi, 4\pi)^T$ rad/s, 位置矢量 r_0 分别为(4.000, 1.000, 4.000) m, (2.899, 6.450, -4.450) m 和(-6.900, -5.450, 0.450) m, 旋转半径矢量为(4.000, -4.000, 4.000) m。

4.1.1 无遮挡效应 对于目标散射中心无遮挡情况, 在成像时间内, 散射点的旋转轨迹包络是连续完整的。由于天线 A, B 和 C 之间的距离相对于雷达与目标之间的距离较小, 所以在实图像域, 对于天线 A, B 和 C 得到的同一个散射点的距离-慢时间像差别较小。在成像时间内, 目标散射点在参考坐标系 X 轴, Y 轴和 Z 轴的理论坐标, 如图 3 所示。

下面利用所提干涉式 3 维成像方法对目标模型进行仿真实验。对天线 A, B 和 C 的回波信号分别处理后, 可得到目标模型的距离-慢时间像, 利用数学形态学中的骨架提取算法对其进行处理。然后, 选取任意一个慢时间点, 获得图像中对应的非零元素在回波信号矩阵中的位置, 提取天线 A 对于目标散射点在快时间频率域的回波信号值 $S'_{Ad}(t_m)$ 。类似地, 可提取天线 B 和 C 对于目标散射点在快时间频率域的回波信号值 $S'_{Bd}(t_m)$ 和 $S'_{Cd}(t_m)$ 。采用文中所提方法对 $S'_{Ad}(t_m)$, $S'_{Bd}(t_m)$ 和 $S'_{Cd}(t_m)$ 进行处理。以散射点 1 为例, 获得各参数粗估计结果为 $d = 5.0$, $r = 4.9$, $\Omega / 2\pi = 2.8$, $\theta = 3.7$, 对各参数估计结果扩展 $\pm 10\%$, 可得参数估计区间分别为 $d \in [4.50, 5.50]$ m, $r \in [4.41, 5.39]$ m, $\Omega / 2\pi \in [2.52, 3.08]$, $\theta \in [3.33, 4.07]$, 利用所提算法对目标参数进行估计, 过程如图 4 所示。由图 4 可知, 在估计过程中多次出现了局部极值点和停滞问题, 所提方法有效地跳出了局部极值点, 解决了停滞问题, 最终寻找到全局最优

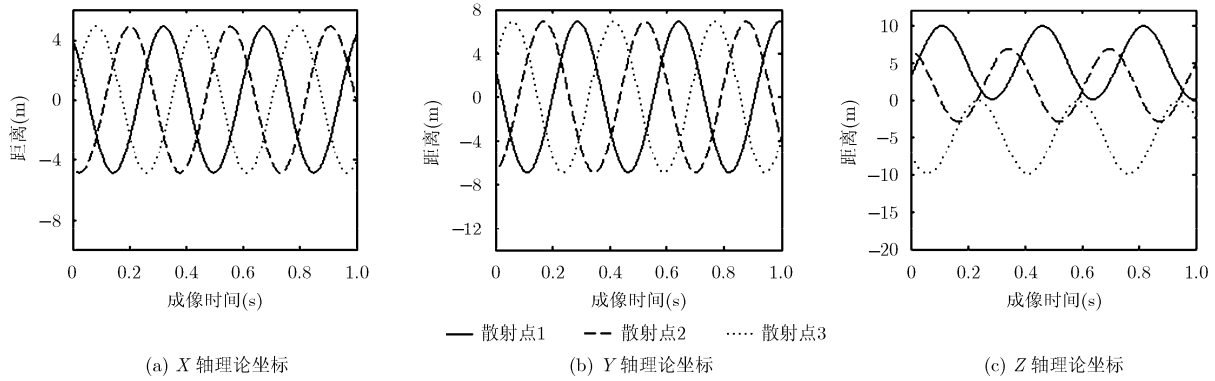


图 3 参考坐标系理论坐标

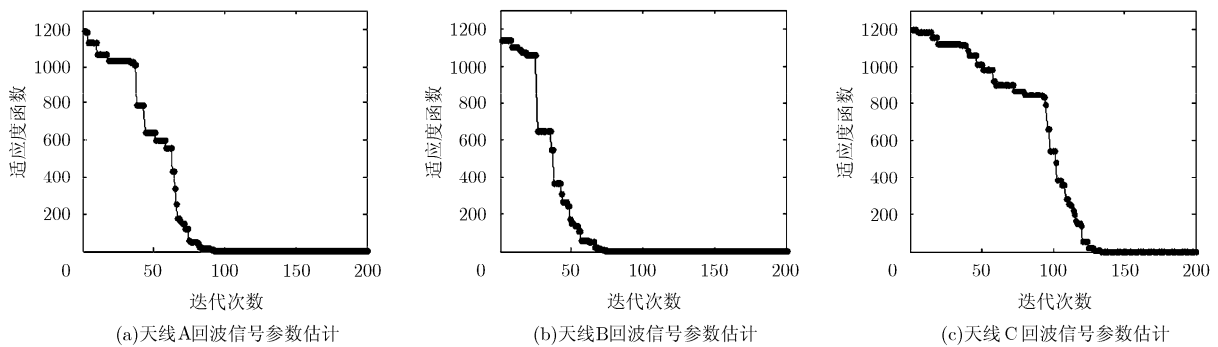


图 4 对散射点 1, 天线 A, B 和 C 回波信号参数估计过程

解。基于所得参数, 计算 $R_{\Delta A1}$, $R_{\Delta B1}$ 和 $R_{\Delta C1}$ 。根据式(4), 式(5), 由所提方法可得到散射点 1 的干涉相位差 $\Delta\varphi_{1AB}$ 和 $\Delta\varphi_{1AC}$ 。再根据式(6), 式(7)可计算得到散射点 1 在参考坐标系 X 轴和 Y 轴的坐标位置 X_1 和 Y_1 。同样地, 对散射点 2 和散射点 3 回波信号进行求解, 可分别重构得到在参考坐标系 X 轴、Y 轴的坐标位置, 结果如图 5 所示, 相应的目标散射点空间位置及旋转轨迹如图 6 所示。

4.1.2 有遮挡效应 在实际应用中, 对于具有一定尺度的真实空间目标, 由于其自旋运动时, 相对视角发生变化, 当目标绕轴作自旋运动时, 目标的散射

中心在不同视角下会产生散射点的周期性遮挡效应, 部分散射点对于雷达是不可见的, 轮流被遮挡, 导致回波距离像包络出现局部的不完整性^[17]。仿真实验中, 以天线 A 为例, 对目标存在遮挡效应时得到的距离-慢时间像, 利用数学形态学中的骨架提取算法进行处理。在有遮挡效应条件下, 距离-慢时间像包络出现不连续的情况, 当任意选择慢时间点时, 不可避免地会发生遗漏目标散射点的情况。因此, 需要对多个不同慢时间点所对应的非零元素个数进行估计, 选择非零元素稀疏度最大时所对应的慢时间点, 在目标 3 维图像重构中, 可有效降低由于遮

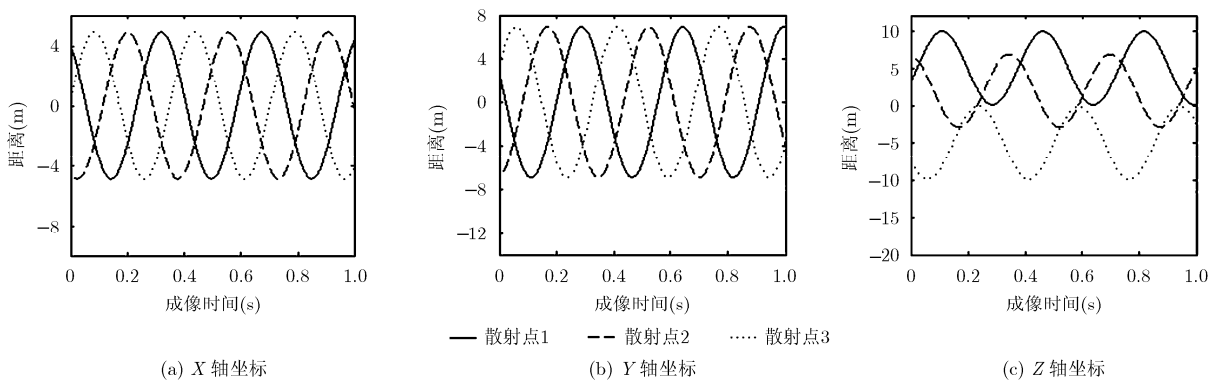


图 5 重构的参考坐标系坐标

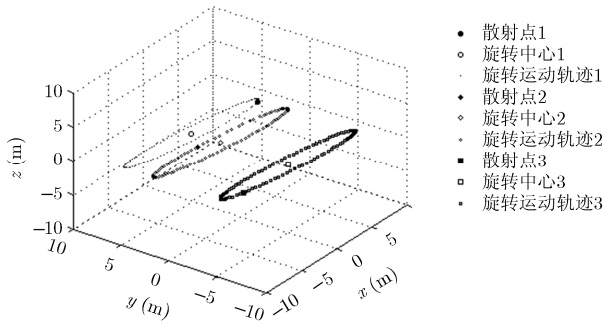


图 6 重构的目标模型空间 3 维图像

挡效应引起的散射点丢失的风险。同样地，按照所提算法，对目标散射点参数进行估计，重构得到参考坐标系坐标如图 7 所示。

4.2 分析与讨论

在本节中，对影响所提方法成像性能的因素进行了分析和讨论，并将所提方法与文献[18]的方法进行了比较。

4.2.1 参数估计结果相对误差对重构结果的影响 由仿真实验结果可知，目标参数估计结果与理论值之间存在误差，本节针对参数估计误差对空间 3 维坐标重构结果的影响进行分析。以散射点 1 在参考坐标系 X 轴的重构结果为例，分别假设参数 d, r, Ω 和 θ 的估计结果相对误差分别为 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% 和 2.5%, 50 次蒙特卡罗仿真实验结果如图 8 所示。由仿真实验结果可知，坐标重构结果对参数 r, Ω 和 θ 的估计结果相对误差不敏感，参数估计结果相对误差对坐标重构结果造成的影响较小。然而，由图 8(b) 可知，当参数 d 的估计结果相对误差为 2.5% 时，相应的坐标重构结果相对误差达到 50%。因此，坐标重构结果对参数 d 的估计结果相对误差较敏感。

4.2.2 信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)对参数估计结果的影响 在 4.2.1 节中分析了参数估计结果相对误差对重构结果的影响，而 SNR 是影响参数估

计结果的重要因素，因此，针对 SNR 变化对参数估计结果的影响进行分析和讨论。仿真实验中，取 SNR 分别为 0 dB, 5 dB, 10 dB, 15 dB 和 20 dB，对散射点 1 的天线 A 回波信号进行参数估计，50 次蒙特卡罗仿真结果如图 9 所示。由图 9 中的仿真实验结果可知， r 和 Ω 的估计结果对 SNR 的变化不敏感，当 SNR 为 0 dB 时，估计结果的相对误差仍很小；参数 d 和 θ 的估计结果对 SNR 的变化较敏感。由 4.2.1 节中的分析可知，参数 θ 的估计结果相对误差对重构结果影响较小，因此，综合以上因素，当 SNR 为 0 dB 时，参数 θ 的估计结果相对误差为 2.0%，对坐标重构结果的影响仍较小。对于参数 d ，当 SNR 为 5 dB 时，其估计结果相对误差为 0.75%，由图 8(b) 中的结果可知，重构结果相对误差为 15%，对重构结果造成了较大影响。因此，综合上述分析结果可知，在 SNR 高于 5 dB 的条件下，基于所提方法可较准确地重构目标真实 3 维坐标。

4.2.3 与已有方法的比较 由于干涉方法对回波信号相位项变化的敏感性，因此，对各散射点回波信号进行区分的方法应具有较好的相位保持性。若处理后的回波信号相位项发生较大改变，那么将难以准确重构目标的真实 3 维坐标。在已有方法中^[18]，往往首先对各散射点的 1 维距离像进行曲线分离处理，然后对各散射点回波信号分别进行干涉处理。该类方法的优点在于具有较好的相位保持性；缺点在于在曲线分离处理中，对曲线交叉点进行处理时，不可避免地在交叉点处出现分离错误的情况，此外，对于存在遮挡效应的情况，距离-慢时间像的包络不连续，也严重影响曲线分离方法的结果^[19]，有待进一步深入研究。因此，与已有方法相比，在无遮挡和有遮挡效应的情况下，所提方法均能够准确重构目标真实 3 维坐标。

5 结论

针对空间微动目标宽带雷达 3 维成像问题，本

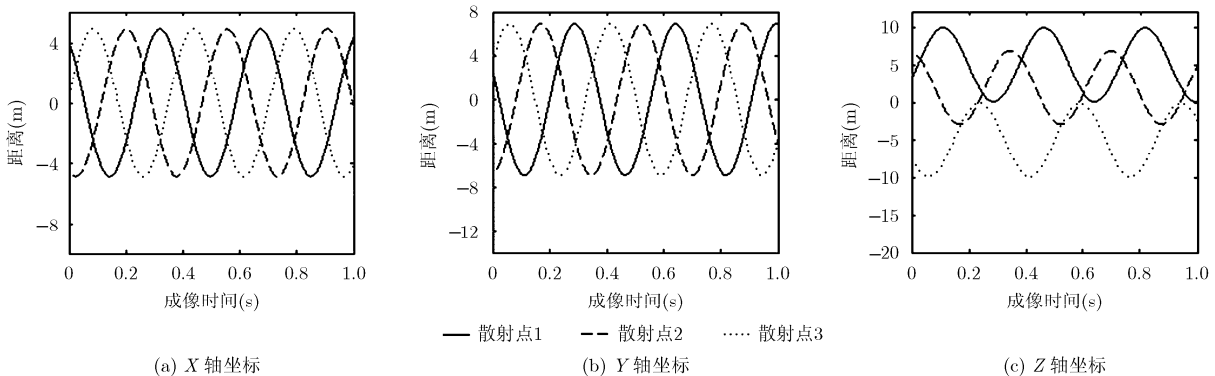


图 7 重构的参考坐标系坐标

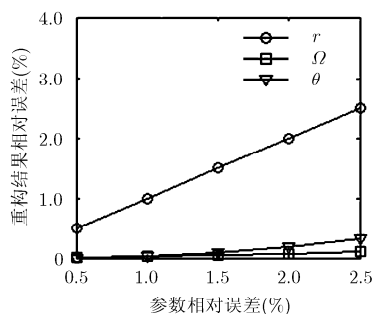
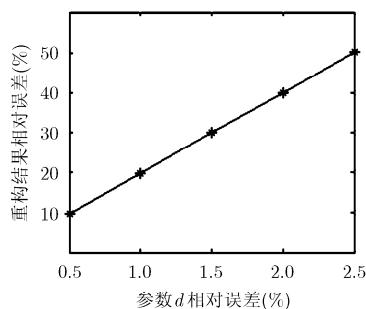
(a) r , Ω 和 θ 的估计结果相对误差对重构结果的影响(b) d 的估计结果相对误差对重构结果的影响

图8 参数估计结果相对误差对坐标重构结果的影响

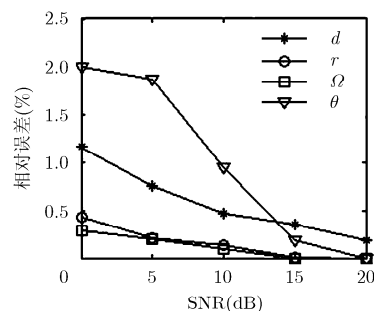


图9 SNR 对参数估计结果的影响

文提出了一种基于改进的粒子群优化的干涉式 3 维成像方法。所提方法通过建立回波信号参数化表征模型、微多普勒相位重构、相位干涉等计算和处理,利用回波信号干涉相位差,重构空间微动目标真实坐标和 3 维图像。相较于已有方法,所提方法在无遮挡和有遮挡效应的条件下,均可准确重构目标空间坐标和 3 维图像,并具有较好的鲁棒性,为有效实现空间微动目标 3 维成像提供了一种思路。仿真结果验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 22-23.
ZHANG Q and LUO Y. Micro-Doppler Effect of Radar Targets[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 22-23.
- [2] 王德纯. 微多普勒雷达述评[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(6): 575-580. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2012.06.006.
WANG Dechun. An overview of micro-Doppler radar[J]. *Journal of CAEIT*, 2012, 7(6): 575-580. doi: 10.3969/j.issn.1673-5692.2012.06.006.
- [3] 张浩鹏, 魏全茂, 张威, 等. 基于序列图像的空间目标三维重建[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(2): 273-279. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0117.
ZHANG Haopeng, WEI Quanmao, ZHANG Wei, et al. Sequential image based space object 3D reconstruction[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(2): 273-279. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0117.
- [4] LIU Hongchao, JIU Bo, LIU Hongwei, et al. Super-resolution ISAR imaging based on sparse Bayesian learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 5005-5013. doi: 10.1109/TGRS.2013.2286402.
- [5] BAI Xueru, ZHOU Feng, and BAO Zheng. High-resolution three-dimensional imaging of space targets in micro-motion [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3428-3440. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2431119.
- [6] MAYHAN J T. Phase-enhanced 3D snapshot ISAR imaging and interferometric SAR[R]. ESC-TR-2007-067, Lexington: Lincoln Laboratory, 2009.
- [7] 王昕, 郭宝锋, 尚朝轩. 基于二维 ISAR 图像序列的雷达目标三维重建方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2475-2480. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00140.
WANG Xin, GUO Baofeng, and SHANG Chaoyuan. 3D reconstruction of target geometry based on 2D data of inverse synthetic aperture radar images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(10): 2475-2480. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.00140.
- [8] 梁必帅, 张群, 娄昊, 等. 基于微动特征关联的空间自旋目标宽带雷达三维成像[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(9): 2132-2140. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01537.
LIANG Bishuai, ZHANG Qun, LOU Hao, et al. Three-dimensional broadband radar imaging of space spinning targets based on micro-motion parameter correlation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(9): 2132-2140. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01537.
- [9] 梁必帅, 张群, 娄昊, 等. 基于微动特征关联的空间非对称自旋目标雷达三维成像方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(6): 1381-1388. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01147.
LIANG Bishuai, ZHANG Qun, LOU Hao, et al. A method of three dimensional imaging based on micro-motion feature association for spatial asymmetrical spinning targets[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(6): 1381-1388. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01147.
- [10] WANG Genyuan, XIA Xianggen, and CHEN V C. Three-dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(3): 436-447. doi: 10.1109/83.908519.
- [11] ZHAO Lizhi, GAO Meiguo, MARTORELLA M, et al. Bistatic three-dimensional interferometric ISAR image reconstruction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and*

- Electronic Systems*, 2015, 51(2): 951-961. doi: 10.1109/TAES.2014.130702.
- [12] LIU C L, HE F, GAO X Z, *et al.* Squint-mode InISAR imaging based on nonlinear least square and coordinates transform[J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(12): 3332-3340. doi: 10.1007/s11431-011-4515-9.
- [13] 刘波, 潘舟浩, 李道京, 等. 基于毫米波 InISAR 成像的运动目标探测与定位[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(3): 258-264. doi: 10.3724/SP.J.1010.2012.00258.
- LIU Bo, PAN Zhouhao, LI Daojing, *et al.* Moving target detection and location based on millimeter-wave InISAR imaging[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(3): 258-264. doi: 10.3724/SP.J.1010.2012.00258.
- [14] CHEN V C, LI F Y, 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.
- [15] 曹文杰, 张磊, 杜兰, 等. 基于瞬时频率估计的进动锥体目标微多普勒频率提取方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(5): 1091-1096. doi: 10.11999/JEIT140985.
- CAO Wenjie, ZHANG Lei, DU Lan, *et al.* Micro-Doppler frequency extraction for cone-shaped target with precession based on instantaneous frequency estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(5): 1091-1096. doi: 10.11999/JEIT140985.
- [16] ZHANG Q, YEO T S, TAN H S, *et al.* Imaging of a moving target with rotating parts based on the Hough transform[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 291-299. doi: 10.1109/TGRS.2007.907105.
- [17] HONG Ling, DAI Fengzhou, and LIU Hongwei. Sparse narrowband radar imaging for spinning targets with occlusion effect[C]. IEEE International Radar Conference, Arlington, USA, 2015: 942-946. doi: 10.1109/RADAR.2015.7131130.
- [18] SUN Yuxue, MA Changzheng, LUO Ying, *et al.* An interferometric-processing based three-dimensional imaging method for space rotating targets[C]. IET International Radar Conference, Guangzhou, China, 2016: 398-402.
- [19] 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.
- 陈春晖: 女, 1986 年生, 工程师, 研究方向为雷达运动目标成像与识别.
- 张 群: 男, 1964 年生, 教授, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 罗 迎: 男, 1984 年生, 副教授, 研究方向为雷达成像与目标识别.
- 孙玉雪: 女, 1992 年生, 研究生, 研究方向为雷达成像与目标识别.