

宽带雷达三维干涉测量弹道目标微动参数估计

魏嘉琪 张磊* 刘宏伟

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

摘要: 宽带雷达微动目标三维干涉测量可为目标运动几何参数估计提供重要信息。该文针对宽带雷达斜视三维干涉测量微动目标参数估计, 提出一种斜视校正干涉测量微动几何参数估计方法。方法对L型天线阵列中各天线接收回波进行干涉测距测角, 通过建立2元2次非线性方程和坐标变换实现斜视扭曲校正, 得到目标散射中心3维运动轨迹, 继而采用滤波和优化求解实现目标微动几何参数估计, 有效提高了微动目标运动几何参数估计准确性和平滑稳健性。

关键词: 3维干涉测量; 微动特征提取; 斜视校正; 参数估计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)04-0787-08

DOI: 10.11999/JEIT180452

Micro-motion Parameters Estimation of Ballistic Targets Based on Wide-band Radar Three Dimensional Interferometry

WEI Jiaqi ZHANG Lei LIU Hongwei

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

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding at

Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Three dimensional interferometry of wide-band radar can provide crucial information for estimating the micro-motion and geometric parameters of targets. For estimation of the micro-motion parameters via three dimensional interferometry in the case of squint observing mode, an algorithm for micro-motion and geometric parameters based on squint calibration is proposed. The algorithm performs ranging and angle measuring for each antenna receiving echo in an L formation array. Moreover, the squint distortion is calibrated and three dimensional trajectories of scattering centers are obtained via establishing two elements and quadratic nonlinear equations and coordinate transformation. In addition, smoothing filtering and optimization are used to retrieve micro-motion and geometry parameters. The effectiveness and robustness of the proposed algorithm is confirmed via extensive experiments.

Key words: Three dimensional interferometry; Micro-motion feature extraction; Squint calibration; Parameter estimation

1 引言

弹道导弹已成为现代战争中的主导武器, 而导弹飞行中段往往会伴有诱饵, 弹头和诱饵等目标微动特性因其质量分布不同而存在明显差异, 因此估计目标的微动参数成为导弹防御系统目标识别重要

技术^[1]。随着高分辨雷达技术和现代信号处理技术的不断发展, 空间目标的微动参数估计已由基于RCS序列的目标微动参数估计逐渐发展到基于微多普勒序列^[2,3]、高分辨距离像序列的目标参数估计等技术。结合相位测距等精细化处理技术, 利用宽带雷达高分辨序列距离像的参数估计, 近年来获得了广泛关注^[4,5]。

目标微动是在3维空间进行的, 关键散射点瞬时位置蕴含丰富的目标运动几何信息, 为3维干涉测量实现目标微动参数估计提供基础^[6-9]。本文考虑分布式相参雷达体制多天线接收系统的空间分集^[10], 利用接收波程相位差对目标瞬时空间位置进行测

收稿日期: 2018-05-11; 改回日期: 2018-10-17; 网络出版: 2018-11-19

*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(17ZR1428700)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771372, 61771367), The Natural Science Foundation of Shanghai (17ZR1428700)

量,进而获得目标3维运动几何参数估计。相较于高分辨距离像序列的参数估计,宽带3维干涉测量技术可为微动目标分析在宽带测距的基础上提供干涉测角信息,为目标微动几何参数估计提供更多自由度和更高稳健性。文献[11]利用目标微动在宽带系统下回波信号的调制特征差异来区分各散射点的回波信号,通过干涉处理重构微动目标的3维坐标。文献[12]采用对目标距离-慢时间像进行干涉处理的方法重构出弹道目标的真实3维坐标并有效估计出目标的微动参数与结构参数。考虑到实际应用中,目标会不可避免地偏离电轴,即在斜视情况下[13,14],上述文献算法重构目标3维坐标将发生坐标扭曲,对目标几何运动参数估计应用受限。

针对以上问题,本文提出了一种斜视校正干涉测量微动几何参数估计方法。首先分别对L型分布式相参雷达体制下各天线接收距离-慢时间回波进行干涉处理,通过求解2元2次非线性方程组并利用坐标变换来校正斜视引起的误差,重构出目标真实的3维运动轨迹;接着利用 α - β 滤波对重构出的3维运动轨迹进行平滑[15],以达到改善3维轨迹估计的波动和阶跃误差;最后利用平滑后的3维运动轨迹优化求解弹道目标微动几何参数。仿真结果表明本文算法可有效重构目标瞬时3维空间位置,验证了算法具有较好的噪声稳定性。该算法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 目标回波信号模型

L型分布式相参雷达与弹道目标几何关系如图1所示, (A, X, Y, Z) 为雷达坐标系, (O, x, y, z) 为参考坐标系,与雷达坐标系平行。收发一体天线A位于雷达坐标系坐标原点,且与接收天线B, C构成沿X轴和Y轴方向相互垂直的干涉基线,基线长L。目标中心O在雷达坐标系下的坐标为 (X, Y, Z) ,其俯仰角及方位角分别是 β 和 α ,目标任意散射点K在参考坐标系下坐标为 (x_k, y_k, z_k) 。图2为弹道目标微

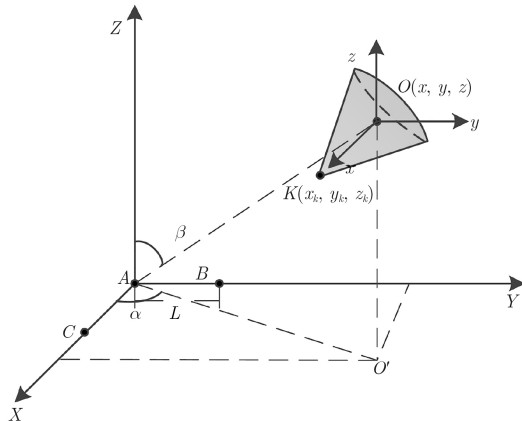


图1 雷达与弹道目标几何关系

动模型示意图, H 为锥体高, r 为底面半径, d 为质心距锥顶的距离,自旋轴 ω_s 和锥旋轴 ω_c 的夹角即为进动角 θ 。锥体弹道目标通常认为只有3个点起作用,分别是图2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 。

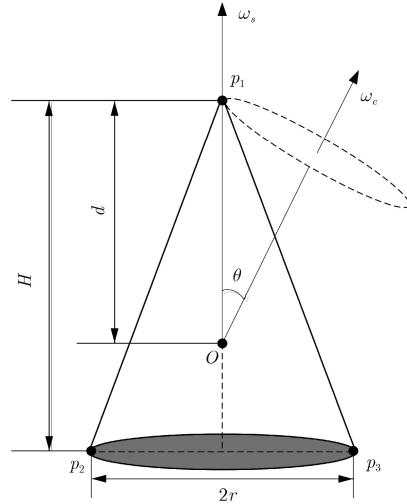


图2 弹道目标微动模型示意图

对目标各散射点回波进行解线频调处理,并消除包络斜置、残余视频项并距离维脉冲压缩后,天线A接收到的散射点K在快时间频域-慢时间的回波信号表示为

$$S_{Ad}(f, t_m) = \sigma_k T_p \sin c \left\{ T_p \left[f + \frac{2\mu}{c} R_{\Delta Ak}(t_m) \right] \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{\Delta Ak}(t_m) \right] \quad (1)$$

其中, σ_k 为射点K的散射系数, T_p 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。 $R_{\Delta Ak}(t_m) = R_{Ak}(t_m) - R_{Aref}(t_m)$, $R_{Ak}(t_m)$ 表示 t_m 时刻散射点K到天线A的距离,本文选择目标中心到各天线的距离做为参考距离,即 $R_{Aref}(t_m) = R_{AO}(t_m)$ 。同理对天线B和天线C的接收回波信号进行相同处理,可得到散射点K在快时间频域-慢时间的回波信号 $S_{Bd}(f, t_m)$ 和 $S_{Cd}(f, t_m)$ 。对A, B, C 3天线的接收回波信号进行干涉处理,即可得到 t_m 时刻散射点K处的干涉相位差,其中 $\text{angle}(\cdot)$ 表示取复数相位

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{AB} &= \text{angle}(S_{Ad}^*(f, t_m) \cdot S_{Bd}(f, t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\Delta Ak} - R_{\Delta Bk}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{AC} &= \text{angle}(S_{Ad}^*(f, t_m) \cdot S_{Cd}(f, t_m)) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} (R_{\Delta Ak} - R_{\Delta Ck}) \end{aligned} \quad (3)$$

3 斜视情况下估计微动目标3维坐标

实际3维干涉测量技术应用中, 目标通常会偏离电轴, 即斜视测量。当斜视达到一定程度时, 两对天线测出的坐标信息不能直接对应散射点真实坐标值, 并且散射点到发射天线的斜距也不能近似为其 z 轴坐标。忽略斜视问题得到的3维坐标必然会在误差, 还会带来相位模糊问题。下面将对斜视情况下干涉3维测量的误差来源进行分析讨论^[14], 并提出相应方法校正斜视带来的误差。

3.1 斜视坐标扭曲分析

以天线对 AB 接收信号模型为例, 根据图1中目标与天线的几何关系, 有

$$R_{Ak} - R_{Bk} = \frac{2L(X + x_k) - L^2}{R_{Ak} + R_{Bk}} \quad (4)$$

$$R_{AO} - R_{BO} = \frac{2LX - L^2}{R_{AO} + R_{BO}} \quad (5)$$

进一步可推导出

$$\begin{aligned} \Delta R_{AB} &= R_{\Delta Ak} - R_{\Delta Bk} = (R_{Ak} - R_{AO}) - (R_{Bk} - R_{BO}) \\ &= (R_{Ak} - R_{Bk}) - (R_{AO} - R_{BO}) \\ &= \frac{2Lx_k(R_{AO} + R_{BO})}{(R_{Ak} + R_{Bk})(R_{AO} + R_{BO})} \\ &\quad + \frac{2LX(R_{AO} + R_{BO} - R_{Ak} - R_{Bk})}{(R_{Ak} + R_{Bk})(R_{AO} + R_{BO})} \\ &\quad - \frac{L^2(R_{AO} + R_{BO} - R_{Ak} - R_{Bk})}{(R_{Ak} + R_{Bk})(R_{AO} + R_{BO})} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, X 为 t_m 时刻目标中心在雷达坐标系的横坐标, x_k 为 t_m 时刻散射点 K 在参考坐标系的横坐标。当远场正视情况下, 可近似有 $R_{Ak} \approx R_{Bk} \approx R_{AO} \approx R_{BO} \approx R_0$, 通过近似后可忽略式(6)的后两项。当目标在斜视情况下, 由于 X 较大导致式(6)中的第2项误差不可忽略, 第2项和第3项即为斜视引起的误差相位项。现有方法大多通过利用中心相位补偿误差相位项来解决斜视问题^[13], 然而中心相位易受噪声的影响, 进而影响估计准确性。本文通过求解一个2元2次非线性方程组直接获得散射点 x 维和 y 维坐标值, 具有较高的运算效率。

3.2 斜视坐标校正

根据上文分析, 斜视时由于误差相位项不可忽略, 下面介绍通过求解一个2元2次非线性方程组校正斜视引起的误差。

类似式(6), 有

$$\begin{aligned} \Delta R_{AC} &= \frac{2Lx_k(R_{AO} + R_{CO})}{(R_{Ak} + R_{Ck})(R_{AO} + R_{CO})} \\ &\quad + \frac{2LX(R_{AO} + R_{CO} - R_{Ak} - R_{Ck})}{(R_{Ak} + R_{Ck})(R_{AO} + R_{CO})} \\ &\quad - \frac{L^2(R_{AO} + R_{CO} - R_{Ak} - R_{Ck})}{(R_{Ak} + R_{Ck})(R_{AO} + R_{CO})} \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)和式(7)中可做如下近似: $R_{AO} + R_{CO} \approx R_{AO} + R_{BO} \approx R_{Ak} + R_{Ck} \approx R_{Ak} + R_{Bk} \approx 2R_0$ 。根据目标与天线的几何关系, 并做泰勒展开有

$$\left. \begin{aligned} f_1 &= R_{AO} + R_{BO} - R_{Ak} - R_{Bk} = \frac{Ly_k}{R_0} \\ &\quad - \frac{1}{R_0} (2x_kX + 2y_kY + 2z_kZ + x_k^2 + y_k^2 + z_k^2) \\ f_2 &= R_{AO} + R_{CO} - R_{Ak} - R_{Ck} = \frac{Lx_k}{R_0} \\ &\quad - \frac{1}{R_0} (2x_kX + 2y_kY + 2z_kZ + x_k^2 + y_k^2 + z_k^2) \end{aligned} \right\} (8)$$

将式(6)–式(8)代入式(2)和式(3)中并作近似后可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{AB} &= \frac{2\pi L}{\lambda R_0} y_k + \frac{2Y - L}{2\lambda R_0^2} L\pi f_1 \\ \Delta\varphi_{AC} &= \frac{2\pi L}{\lambda R_0} x_k + \frac{2X - L}{2\lambda R_0^2} L\pi f_2 \end{aligned} \right\} (9)$$

式(8)中 f_1 和 f_2 中的 z_k 用 A 天线接收信号的距离-慢时间维图像中散射点 K 所在距离单元坐标表示。则式(9)为关于 x_k 和 y_k 2元2次非线性方程组, 通过穷举优化搜索求得方程组的解, 即为斜视时散射点的 x 轴和 y 轴坐标。

斜视时雷达视线与目标纵轴存在较大夹角, 散射点到天线的斜距不能直接近似为 z 轴坐标, 在此进行坐标变换即可完成坐标校正。如图3, 对参考坐标系 (x, y, z) 做两次坐标变换后得到雷达视线坐标系 (w, u, v) , K 为目标上一散射点, O 为目标中心, β 和 α 分别是俯仰角和方位角。

首先以 z 轴为旋转轴, 将 xoy 顺时针旋转 $\pi/2 - \alpha$ 到 wou' , 将 xyz 坐标系变换到 $owu'z$ 坐标系, 再以 w 轴为旋转轴, 将 zou' 顺时针旋转 β 到 vou , 将 $owu'z$ 坐标系变换到 $owuv$ 坐标系。通过两次坐标变换将参考坐标系转换成雷达视线坐标系, 即

$$\begin{bmatrix} w \\ u \\ v \end{bmatrix} = M_1 \cdot M_2 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (10)$$

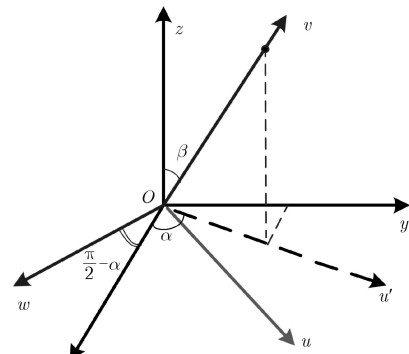


图3 坐标系变换示意图

其中 M_1 和 M_2 分别为两次坐标变换的旋转矩阵, 通过求解式(10)可得

$$z = (v - y \sin \beta y) (1 / \cos \beta) \quad (11)$$

根据式(11)求得斜视状态下散射点 K 的 z 轴坐标 z_k 。由此, 即可得到斜视情况下任意时刻第 K 个散射点在参考坐标系中的真实坐标。对目标上所有散射点进行上述处理后即可重构出微动目标运动轨迹。

3.3 $\alpha - \beta$ 滤波平滑运动轨迹

由于噪声和距离分辨率的影响, 上述步骤获得的散射点重构3维运动轨迹曲线会出现波动和阶跃现象, 与真实运动轨迹偏差过大, 若利用其直接进行微动参数估计, 会导致较大的参数估计误差。因此需要对重构3维运动轨迹进行平滑滤波, 以减少误差带来的不利影响。微动目标散射中心运动模型不易建立, 本文用CV模型进行近似。本文目标的角速度和角加速度变化较小, 利用 $\alpha - \beta$ 滤波对目标的真实运动信息的影响不大。因此利用 $\alpha - \beta$ 滤波对重构3维运动轨迹曲线进行处理, $\alpha - \beta$ 滤波的数学原理在此不再赘述。经 $\alpha - \beta$ 滤波后获得经平滑处理后的3维运动轨迹^[15]。

4 目标微动参数估计

由上节重构目标3维运动轨迹可以看出, 目标的微动几何参数与3维运动轨迹有直接关系。本节在获取目标真实3维坐标曲线的基础上首先估计进动频率, 然后结合重构运动轨迹3维图像的几何关系估计进动角和几何参数。

4.1 目标进动频率估计

对于进动目标而言, 锥顶散射点的微动变化曲线为正弦形式, 频域为单频信息, 频点位置由进动频率确定, 可直接对目标进动频率进行估计。

对上一节估计所得的锥顶散射点坐标曲线 $x_k(t_m)$ 做傅里叶变换, $F = \text{FFT}(x_k(t_m))$, F 即代表坐标曲线频谱, 则目标进动频率估计值可表示为: $\hat{f}_c = \langle \max(F) \rangle$ 。

4.2 目标进动角及几何参数估计

利用3维干涉测量技术对弹道目标回波进行处理后, 可得到在观测时间内与目标真实空间位置一

致的各散射点3维运动轨迹图像, 利用该图像可以提取目标进动角及几何参数^[12]。

根据图2的几何关系, 设向量 n 为锥顶散射点运动轨迹平面的法向量, K 和 P 分别为某一时刻锥顶和锥底散射点所在位置, 则向量 OK 为该时刻自旋轴所在向量, $\|KP\|$ 为锥体目标母线长, 那么进动角 θ 可表示为

$$\theta = \arccos \frac{n \cdot OK}{\|n\| \cdot \|OK\|} \quad (12)$$

半锥角 η 即为母线与自旋轴的夹角, 可表示为

$$\eta = \arccos \frac{KP \cdot KO}{\|KP\| \cdot \|KO\|} \quad (13)$$

根据几何关系, 锥体高度 H 即为母线长在自旋轴上的投影, 可表示为

$$H = \|KP\| \cdot \cos \eta \quad (14)$$

根据勾股定理即可得出底面半径 r

$$r = \sqrt{\|KP\|^2 - H^2} \quad (15)$$

至此完成斜视测量下的宽带雷达3维干涉测量目标微动参数估计。为了更清楚地说明本文算法, 具体流程如图4所示。

5 仿真实验

本实验所估计弹道目标形状如图2, 主要目标参数如表1所示, 主要雷达参数如表2所示。

5.1 仿真对比实验

初始时刻目标中心在雷达坐标系下的坐标为(2 km, 2 km, 10 km)。为对比本文所提方法重构3维运动轨迹的精确性, 在本文设置的实验条件下, 使用参考文献[12]中的估计方法, 直接通过干涉测量求解各散射点的 x 轴和 y 轴坐标, 并根据 A 天线接收回波距离-慢时间像求得各散射点 z 轴坐标。理论3维坐标如图5所示, 文献[12]干涉测量重构3维坐标如图6所示。

从图6可以看出, 由于斜视角的存在, 利用文献[12]中所提方法直接通过干涉测量技术重构的3维坐标与真实值有较大偏差。在相同的实验条件下, 利用本文算法, 在干涉测量的基础上通过求解式(9)

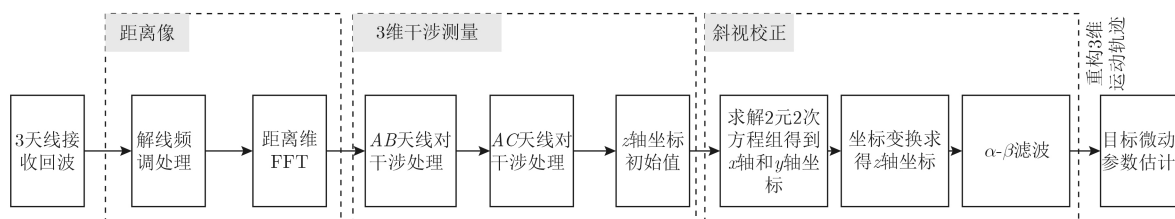


图4 斜视背景下目标微动参数估计流程图

表1 实验锥体目标参数

参数	数值
锥体高度 H (m)	0.96
质心到锥顶距离 d (m)	0.64
底面半径 r (m)	0.25
自旋频率 f_s (Hz)	2
锥旋频率 f_z (Hz)	3
进动角 θ ($^\circ$)	10

表2 雷达系统的主要参数

参数	数值
载频 f_0 (GHz)	10
带宽 B (GHz)	1
脉冲宽度 t_p (μ s)	10
脉冲重复周期prf (Hz)	100
驻留时间 T (s)	1
基线长 L (m)	200

和式(11)完成斜视校正，得到的3维重构坐标如图7所示。可以看出，图7中的重构坐标更接近理论值。

由于图7中重构的3维坐标存在波动和阶跃现象，不利于后续微动参数估计。故采用 $\alpha - \beta$ 滤波对

重构出的3维坐标曲线进行平滑，结果如图8所示，与图7对比可以看出平滑处理能够明显改善重构坐标曲线中的波动和阶跃现象。根据图9散射点微动轨迹可以看出平滑处理后的图9(c)较未平滑处理的图9(b)更接近理论值。

结合瞬时3维坐标估计值 $F_c(t_m)$ ，瞬时3维坐标理论值 $F_r(t_m)$ ，给出式(16)定义估计结果的相似度：

$$A = \left(1 - \frac{\sum_{t_m} |F_r(t_m) - F_c(t_m)|}{\sum_{t_m} |F_r(t_m)|} \right) \times 100\% \quad (16)$$

实验是在信噪比为20 dB条件下进行，所得实验结果相似度记录在表3中。

从表3和图8中可以看出，相较于文献[12]中所提算法，本文算法能够有效校正斜视带来的重构坐标误差，有较高的曲线估计相似度。

5.2 目标参数估计结果

对锥顶散射点的坐标曲线进行傅里叶变换即可求得目标进动频率 $f_c = 3$ Hz。在所估计出的3维微动轨迹曲线中取任一时刻锥顶散射点所在位置 K 和锥底散射点所在位置 P ，通过求解式(12)–式(15)即可得到目标进动角及几何参数估计值。参数估计结

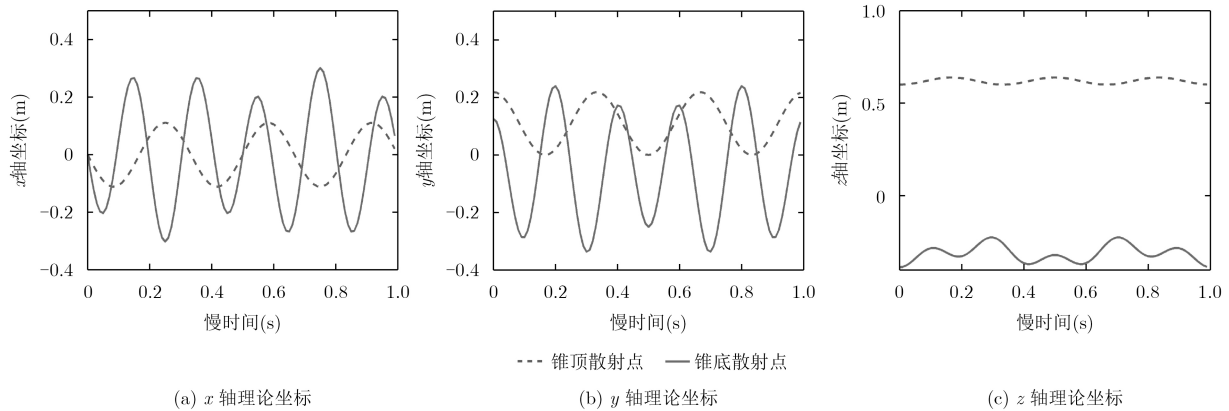


图5 理论3维坐标

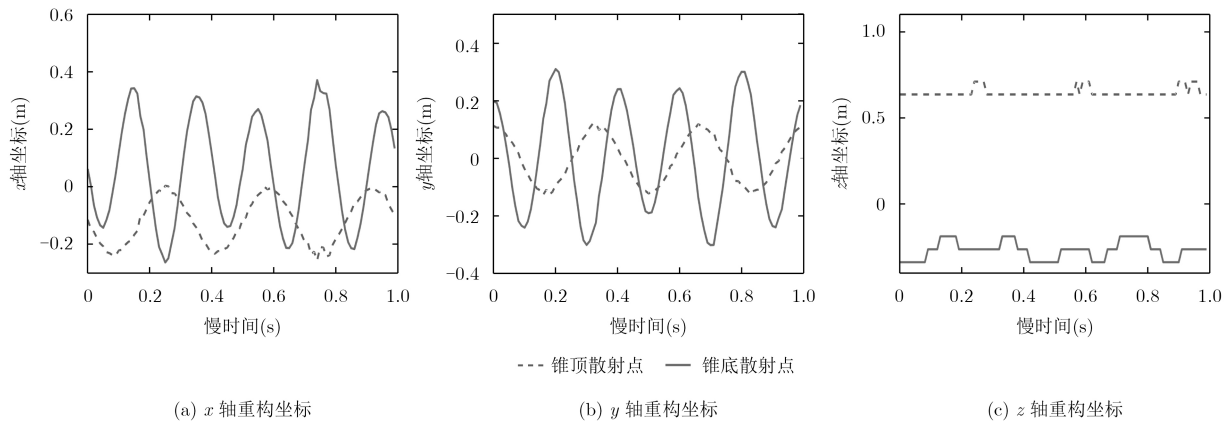


图6 文献[12]干涉测量重构3维坐标

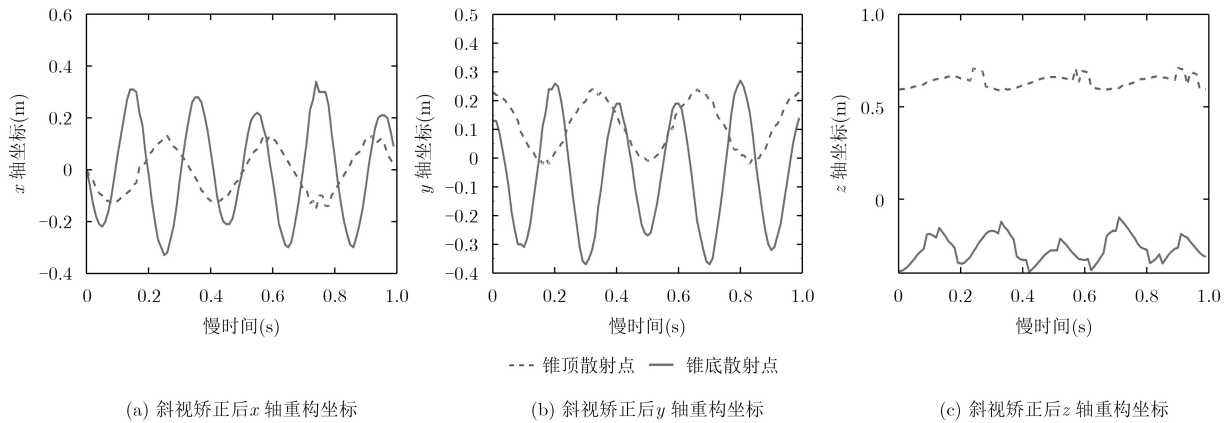


图7 斜视校正后3维重构坐标

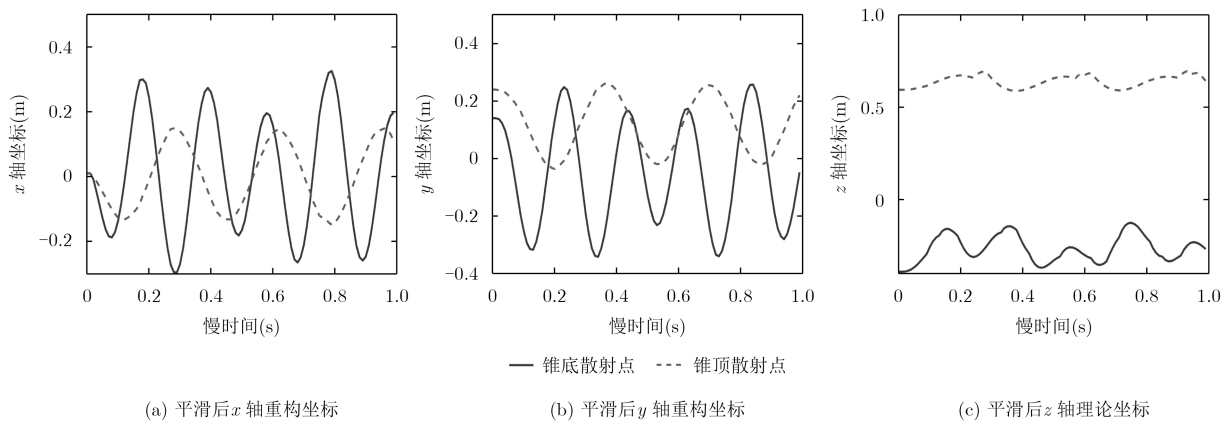


图8 平滑后3维重构坐标

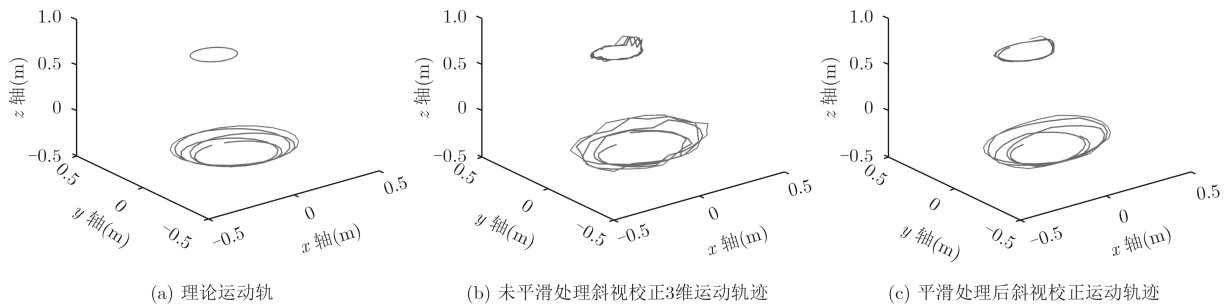


图9 散射点微动轨迹

表3 曲线估计实验结果相似度(%)

	锥顶散射点 x	锥顶散射点 y	锥顶散射点 z	锥底散射点 x	锥底散射点 y	锥底散射点 z
文献[12]干涉测量	68.26	60.42	88.72	62.93	64.91	82.73
斜视校正干涉测量	88.56	90.41	96.59	90.84	91.24	87.28

果如表4所示。可以看出，由未平滑处理的重构运动轨迹估计目标参数结果与真实值偏差过大。

上述实验在SNR为20 dB的实验条件下得出，为验证方法的稳定性，设置SNR=-15~20 dB进行噪声稳健性分析，并以式(17)定义估计相对误差

$$Q = \frac{|a - \bar{a}|}{a} \times 100\% \quad (17)$$

其中， a 和 \bar{a} 分别代表目标参数真实值与估计值。其他条件不变的情况下，在各信噪比下进行50次蒙特卡罗仿真实验，各参数估计相对误差如图10所示。

从表4可以看出，各参数估计值与实验模型参数设置值都较为接近，从图10可以看出，SNR较低时，由于 $\alpha - \beta$ 滤波器的输出受噪声影响较大，进而影响了参数估计精度。在SNR高于5 dB条件下，

表4 目标参数估计结果

	进动频率 f_c (Hz)	进动角 θ (°)	半锥角 η (°)	锥体高度 H (m)	底面半径 r (m)
真实值	3	10.00	14.59	0.96	0.25
平滑处理估计值	3	9.60	15.25	0.95	0.26
未平滑处理估计值	3	12.49	18.17	0.87	0.31

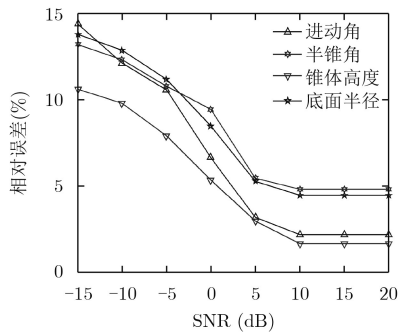


图10 SNR对参数估计影响

相对误差最大的参数估计精度也在5%以内, 可以说明本文算法有较高稳定性。

6 结束语

本文以L型分布式相参雷达作用在锥体弹道目标为模型, 利用斜视3维干涉测量技术处理回波信号, 通过求解一个2元2次非线性方程组和坐标变换重构斜视情况下散射点3维运动轨迹, 并在此基础上通过滤波和优化求解实现目标微动几何参数估计。实验结果表明该方法通过斜视3维干涉测量可有效重构散射点3维空间位置, 并且具有较高的稳健性。但目前本文仅针对单个光滑锥体目标在进动模式下的参数估计, 而实际情况中目标的个数、形状和运动方式会更加复杂, 重构运动轨迹和参数的估计也会更加困难, 后续工作中可对上述问题进行进一步研究。

参考文献

- [1] CHEN V C, LI Fayin, HO Shen Shyang, *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](https://doi.org/10.1109/TAES.2006.1603402).
- [2] 束长勇, 张俊生, 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](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0500).
SHU Changyong, ZHANG Junsheng, 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](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2016.0500).
- [3] 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](https://doi.org/10.11999/JEIT170163).
ZHOU Yejian, ZHANG Lei, JIAN Mao, *et al.* Micro-motion estimation for ballistic targets with multi-frequency chirp decomposition[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2017, 39(10): 2360–2365. doi: [10.11999/JEIT170163](https://doi.org/10.11999/JEIT170163).
- [4] LIU Yongxiang, ZHU Dekang, LI Kangle, *et al.* Micromotion characteristic acquisition based on wideband radar phase[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3650–3657. doi: [10.1109/TGRS.2013.2274478](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2274478).
- [5] 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](https://doi.org/10.1007/s11432-016-0097-4).
- [6] 蒋彦雯, 邓彬, 王宏强, 等. 基于双频联合处理的太赫兹 InISAR成像方法[J]. *雷达学报*, 2018, 7(1): 139–146. doi: [10.12000/JR17109](https://doi.org/10.12000/JR17109).
JIANG Yanwen, DENG Bin, WANG Hongqiang, *et al.* An improved terahertz InISAR imaging method based on the joint processing of two frequency band data[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 139–146. doi: [10.12000/JR17109](https://doi.org/10.12000/JR17109).
- [7] 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](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130702).
- [8] MA Changzheng, YEO Tat Soon, ZHANG Qun, *et al.* Three-dimensional ISAR imaging based on antenna array[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(2): 504–515. doi: [10.1109/TGRS.2007.909946](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.909946).
- [9] 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](https://doi.org/10.1109/83.908519).
- [10] 鲁耀兵, 张履谦, 周荫清, 等. 分布式阵列相参合成雷达技术研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(8): 1657–1662. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2013.08.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2013.08.12).
LU Yaobing, ZHANG Lüqian, ZHOU Yinqing, *et al.* Study

- on distributed aperture coherence-synthetic rader technology[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(8): 1657–1662. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2013.08.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2013.08.12).
- [11] 陈春晖, 张群, 罗迎, 等. 一种空间微动目标宽带雷达干涉三维成像方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3144–3151. doi: [10.11999/JEIT161025](https://doi.org/10.11999/JEIT161025).
- CHEN Chunhui, ZHANG Qun, LUO Ying, *et al.* Interferometric three dimensional imaging method for space micro-motion target based on wideband radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3144–3151. doi: [10.11999/JEIT161025](https://doi.org/10.11999/JEIT161025).
- [12] 胡健, 罗迎, 张群, 等. 弹道目标宽带雷达干涉式三维成像与微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1865–1871. doi: [10.11999/JEIT161134](https://doi.org/10.11999/JEIT161134).
- HU Jian, LUO Ying, ZHANG Qun, *et al.* Three-dimensional interferometric imaging and micro-motion feature extraction of ballistic targets in wideband radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1865–1871. doi: [10.11999/JEIT161134](https://doi.org/10.11999/JEIT161134).
- [13] 李丽亚, 刘宏伟, 纠博, 等. 斜视干涉逆合成孔径雷达成像算法[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(10): 1290–1294. doi: [10.3321/j.issn:0253-987X.2008.10.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-987X.2008.10.020).
- LI Liya, LIU Hongwei, JIU Bo, *et al.* An interferometric inverse synthetic aperture radar imaging algorithm for squint model[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(10): 1290–1294. doi: [10.3321/j.issn:0253-987X.2008.10.020](https://doi.org/10.3321/j.issn:0253-987X.2008.10.020).
- [14] LIU Chenglan, HE Feng, GAO Xunzhang, *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](https://doi.org/10.1007/s11431-011-4515-9).
- [15] 吕少霞. ISAR成像的横向定标算法研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工业大学, 2007.
- LÜ Shaoxia. Cross-range scaling algorithm based on ISAR imaging[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2007.
- 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.