

空间目标的短时三维几何重构方法

徐丹* 符吉祥 孙光才 邢孟道 苏涛 保铮

(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: 通常空间自旋目标的3维(3D)重构都是通过对散射点轨迹进行矩阵分解的方法得到的, 散射点轨迹是从雷达序列图提取并关联得到的。由于散射点提取与关联误差的存在, 3D重构会出现精度下降, 甚至失败的问题。另一方面, 转台目标的散射点轨迹符合圆属性, 这与几何投影理论认为散射点投影轨迹的椭圆属性相违背。为解决以上问题, 该文提出了基于短时的空间目标3D重构算法。首先对提取的散射点轨迹进行2维圆属性拟合, 使其轨迹光滑, 更接近理论曲线。然后采用多视角的方法估计雷达视角(LOS), 通过乘以雷达视角构成的系数, 将圆属性轨迹曲线转变成椭圆属性轨迹曲线。通过对散射点椭圆属性轨迹进行矩阵分解的方法获得目标的3D结构。最后通过2个实验验证了该文所提算法的有效性。

关键词: 雷达序列图; 短时空间目标3D重构; 圆属性拟合; 矩阵分解

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)08-1952-08

DOI: 10.11999/JEIT180936

A Short Time 3D Geometry Reconstruction Method of Space Targets

XU Dan FU Jixiang SUN Guangcai XING Mengdao SU Tao BAO Zheng

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

(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understand,

Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Generally speaking, Three Dimension (3D) imaging of spinning space target is obtained by performing matrix factorization method on the scattering trajectories obtained from sequential radar images. Because of the errors of scattering center extraction and association, the 3D reconstruction accurate is reduced or even fail. In addition, the scattering center trajectory from turntable target consists with circle nature, which is inconsistent with the elliptic property of the scattering center trajectory obtained by optical geometry projection. To tackle these problems, this paper proposes a short time 3D reconstruction method of space target. Firstly, the retrieved trajectory is fitted with 2D circular nature to make the trajectory smooth and closer to the theoretical curve. Then the radar Line Of Sight (LOS) is estimated by multiple views and the circular curve is converted into elliptical curve by multiplying the coefficients calculated by the LOS. The 3D reconstruction can be obtained by performing matrix factorization method on elliptical curves. Finally, the simulations verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: Sequential radar images; Short time space 3D targets reconstruction; Circular nature fit; Matrix factorization

1 引言

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)由于其全天时, 全天候都能观测的

能力, 在军用与民用领域获得广泛应用。在太空中随着人造目标的增多, 空间碎片已经对宇航员、人造飞行器、宇航员太空活动等安全造成极大的威胁^[1]。目前对空间目标的成像算法主要为基于窄带的2维成像算法, 这些算法均利用了目标绕其主轴自旋这一特征^[2-4]。2维成像一般为3维空间目标在2维成像平面的投影, 在实际应用中, 3维成像有助于获得目标更多形状信息、运动特性, 因此空间目标3维成像的研究非常重要。目前3维成像包括干涉逆合

收稿日期: 2018-10-08; 改回日期: 2019-04-08; 网络出版: 2019-04-23

*通信作者: 徐丹 xudandan_xd@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405600)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (2017YFC1405600)

成孔径雷达(Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar, InISAR)^[5,6]、多快拍3维成像^[7]和基于雷达序列图的3维重构算法^[8-11]等。其中基于雷达序列图的3维重构算法需要的设备较少,但是需要对各序列图进行散射点提取和关联,得到各散射点运动轨迹矩阵。由于ISAR图的稀疏性,散射点提取可以采用基于稀疏模型^[12,13]进行,另外关于散射点关联的算法有基于马尔科夫链^[14]和基于最大似然^[15]的估计等。由于传统3维重构算法都基于目标轨迹已经通过散射点关联等处理,且观测时间长,目标转角较大的假设,没有考虑经过运动补偿后,短时间观测的转台目标散射点轨迹符合圆属性这一特性。另一方面,传统3D重构算法依赖于大的目标转角,才能获得高精度重构结果,但散射点各向异性和散射点轨迹遮挡等问题,导致3维重构精度下降或失败的现象^[8],需要高精度的方位定标才能提高重构精度,但对每个子孔径都进行高精度方位定标运算量极大,不利于3D重构应用与推广。

针对以上问题,本文提出短时间空间目标3维重构算法。对于散射点提取和散射点轨迹关联,且对散射点定标要求不再严格,利用散射点提取出来的2维位置进行2维联合关联并进行圆属性拟合,不需要目标有很大的转角,准确性较高。目标转角小,子孔径少,避免了大量序列图定标带来的运算量大的问题。由于对轨迹进行了重构,3维重构失败的现象不再出现。首先对雷达序列图进行散射点提取与关联,获得散射点轨迹并进行圆属性拟合,通过多视角获得雷达视角并对拟合的轨迹的方位维进行缩放,获得椭圆属性轨迹。然后对得到的椭圆属性轨迹进行矩阵分解获得目标3维结构。最后采用仿真实验与对比实验对本算法进行了验证。

2 空间目标短时3D重构算法分析

运动补偿后,自旋目标转变为转台目标,如图1所示。将目标重心 O 设置为坐标原点,以目标旋转轴为 Z 轴,也就是 w 的方向,初始时刻以雷达视线与 Z 轴所在平面建立 Y 轴,使得 Y 轴与 Z 轴垂直,根据右手螺旋定律建立 X 轴。设雷达视线与 Z 轴夹角为 θ ,随着目标旋转,雷达视线与 X 轴夹角为 φ 。一般空间目标形状较为简单,假设目标上强散射点表示为 $P = p_q (q = 0, 1, \dots, Q)$,雷达回波通过有重叠的划分为 K 个子图像。

假设雷达视线角短时间内保持不变,则其单位向量可以表示为

$$l = [\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta]^T \quad (1)$$

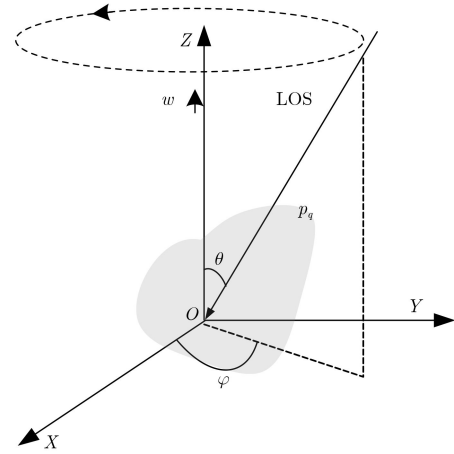


图1 转台模型

同时,距离向单位向量和 l 一致。在第 k 个序列图时刻,目标上散射点到距离向投影位置可以表示为

$$r_k = P_k^T l = P_0^T \mathfrak{R}(\Psi(k)) l \quad (2)$$

其中, P_0 表示初始时刻目标的姿态, P_k 表示目标 k 时刻的姿态, $\Psi(k)$ 表示目标 k 时刻的旋转角度, $\mathfrak{R}(\cdot)$ 表示目标旋转函数。目标方位向向量垂直于目标旋转轴与雷达视线方向组成的平面,方位向单位向量可以表示为

$$a = \frac{w \times l}{\|w \times l\|} = [\sin \varphi, -\cos \varphi, 0]^T \quad (3)$$

目标在方位向投影大小为

$$d_k = P_k^T a = P_0^T \mathfrak{R}(\Psi(k)) a \quad (4)$$

在目标坐标系中,假设目标不动,相应地,雷达视线和方位向方向向量随时间改变,则 k 时刻,距离向单位向量 i_k 和方位向单位向量 j_k 分别表示为

$$i_k = \mathfrak{R}(\Psi(k)) l = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos(\Psi(k) + \varphi) \\ \sin \theta \sin(\Psi(k) + \varphi) \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$j_k = \mathfrak{R}(\Psi(k)) a = \begin{bmatrix} \sin(\Psi(k) + \varphi) \\ -\cos(\Psi(k) + \varphi) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

目标在距离向与方位向 k 时刻的投影位置可以写成更紧凑的形式

$$\begin{bmatrix} r_k \\ d_k \end{bmatrix} = (P_0^T [i_k, j_k])^T = \begin{bmatrix} i_k^T \\ j_k^T \end{bmatrix} P_0 \quad (7)$$

对于自旋目标,散射点投影位置时刻在改变。将运动等效到雷达视线绕目标旋转轴的自旋运动,目标静止的形式,则观测期间散射中心在投影平面的投影位置的矩阵表示可以写成

$$W = EP_0 \left. \begin{aligned} W &= \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_K \\ d_1 \\ \vdots \\ d_K \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} i_1^T \\ \vdots \\ i_K^T \\ j_1^T \\ \vdots \\ j_K^T \end{bmatrix}, P_0 = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_Q \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_Q \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_Q \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} (8)$$

式(8)揭示了3维空间位置投影到2维平面的过程。 R 是其投影矩阵,基于投影向量的性质,其模值为1。另外,根据距离向与方位向投影向量相互垂直,则有了如式(9)约束关系

$$\left. \begin{aligned} i_k^T i_k &= 1 \\ j_k^T j_k &= 1 \\ i_k^T j_k &= 0 \end{aligned} \right\} (9)$$

对式(8)进行矩阵分解,对分解结果添加式(9)的约束条件,理论上便可以得到目标3D结构。由于具体矩阵分解与约束添加过程不是本文重点,且已有大量文献进行过此类方法研究^[8-11],本文不再赘述。

3 投影轨迹分析

3.1 几何投影轨迹与雷达投影轨迹对比与分析

从式(7)可知,根据投影理论分析,目标轨迹曲线应该为椭圆,可以表示为 Γ_1 ,以第 q 个散射点为例

$$\Gamma_1: \left(\frac{r_{k,q} - z_q \cos \theta}{\sin \theta} \right)^2 + d_{k,q}^2 = \kappa_q^2 \quad (10)$$

其中, $r_{k,q}$ 和 $d_{k,q}$ 分别表示散射点 q 的距离向与方位向 k 时刻的位置,属于 r_k 和 d_k 的第 q 个元素, x_q, y_q 和 z_q 分别表示目标 P_0 第 q 个散射点的3维坐标。 $\kappa_q = \sqrt{x_q^2 + y_q^2}$ 表示目标坐标系中散射点的旋转半径。显然,曲线 Γ_1 为椭圆,中心在 $(z_q \cos \theta, 0)$ 。

其长轴长度为 κ_q ,方向和方位向一致。短轴长度为 $\kappa_q \sin \theta$,方向与距离向一致。

以上 Γ_1 是从理论分析中得来的,下面将从雷达序列图方面进行分析,并假设从雷达序列图获得的散射点轨迹曲线为 Γ_2 ,目标 P_0 在 k 时刻成像平面上的距离向与方位向位置分别表示为 R_k 和 D_k ,则第 q 个散射点对应的距离向与方位向位置分别表示为 $R_{k,q}$ 和 $D_{k,q}$,分别属于 R_k 与 D_k 的第 q 个元素。因为距离向分析与 Γ_1 相同,所以 Γ_2 的距离向也表示为

$$R_{q,k} = \kappa_q \sin \theta \cos(\Psi(k) + \varphi - \varphi_q) + z_q \cos \theta \quad (11)$$

多普勒频率是与距离导数相关的结果,假设短时间观测期间目标为匀加速旋转运动,其旋转速度和旋转加速度表示为 w_k 和 a_k , t_k 表示第 k 个序列图相应的时间, $\varphi_q = \arccos(x_q/\kappa_q)$ 。则多普勒频率表示为

$$f_{q,k} = \frac{2\kappa_q(w_k + a_k t_k) \sin \theta \sin(\Psi(k) + \varphi - \varphi_q)}{\lambda} \quad (12)$$

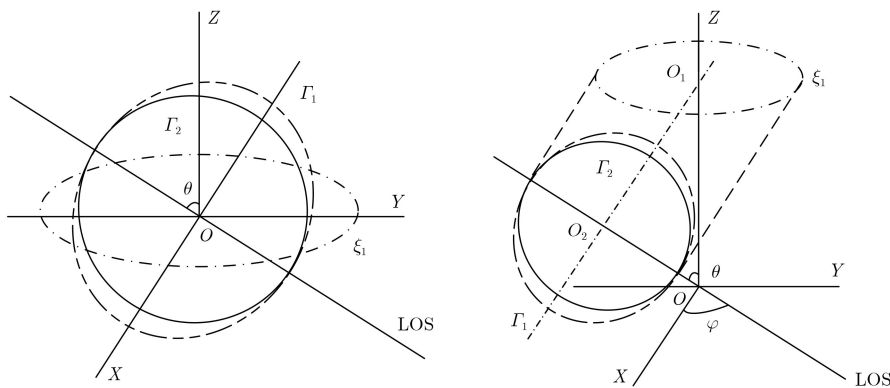
其中, λ 表示波长,方位向分辨率表示为 $p = \frac{\lambda \text{PRF}}{2(w_k + a_k T_c)M}$,其中PRF表示脉冲重复频率。则方位向投影位置可以表示为

$$D_{k,q} = p \frac{f_{q,k}}{\Delta f} = \kappa_q \sin \theta \sin(\Psi(k) + \varphi - \varphi_q) \quad (13)$$

其中, $\Delta f = \text{PRF}/M$,表示多普勒频率间隔。至此 Γ_2 曲线形状表示为

$$\Gamma_2: \left(\frac{R_{k,q} - z_q \cos \theta}{\sin \theta} \right)^2 + \left(\frac{D_{k,q}}{\sin \theta} \right)^2 = \kappa_q^2 \quad (14)$$

观察式(14),容易发现 Γ_2 曲线是一个以 $(z_q \cos \theta, 0)$ 为圆心,以 $\kappa_q \sin \theta$ 为半径的圆。图2表示散射点旋转平面在不同的Z的位置时的情况。图2(a)散射点3D空间旋转轨迹为 ξ_1 ,圆心在 $(0,0,0)$ 上,理论轨迹 Γ_1 和检测轨迹 Γ_2 的圆心也在 $(0,0,0)$ 。图2(b)散射点3D空间旋转轨迹 ξ_1 圆心在 $(0,0,z_q)$,则理论



(a) 旋转平面位于OXY平面时

(b) 旋转平面位于OZ轴上

图2 旋转平面位于不同位置的情况

轨迹 Γ_1 和检测轨迹 Γ_2 的中心在 $(-z_q \cos \theta \sin \theta \cos \varphi, -z_q \cos \theta \sin \theta \sin \varphi, z_q \cos^2 \theta)$ 。从雷达2D成像结果分析, 则理论轨迹 Γ_1 和检测轨迹 Γ_2 的中心总是位于 $(0, z_q \cos \theta)$ 点, 即方位向中心总是0。

3.2 雷达投影轨迹与几何投影轨迹转化

观察式(10)与式(14), 则曲线 Γ_1 和 Γ_2 的转变关系为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{r}_k \\ \mathbf{d}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/\sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_k \\ \mathbf{D}_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $1/\sin \theta$ 是关于雷达视线角的一个缩放系数。通常, 雷达视线角是不能通过单基雷达短时间内估计出的, 需要通过多视角进行估计。如图3所示, 空间目标飞行一小段距离, 假设雷达视角差为 $\Delta \theta$, 两个雷达视角与目标转轴夹角分别为 θ_1 和 θ_2 , 且 $\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$ 。

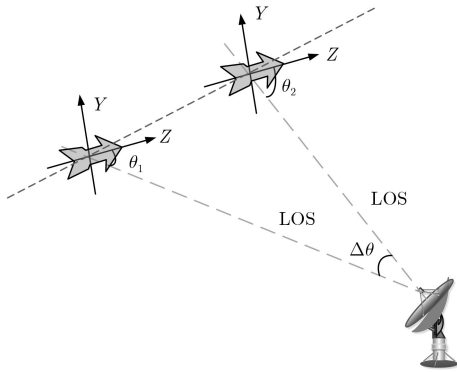


图3 多视角观测模型

目标距离向轨迹可以表示为

$$\left. \begin{aligned} R_{k_1,q} &= \kappa_q \sin \theta_1 \cos(\Psi(k_1) + \varphi - \varphi_q) + z_q \cos \theta_1 \\ R_{k_2,q} &= \kappa_q \sin \theta_2 \cos(\Psi(k_2) + \varphi - \varphi_q) + z_q \cos \theta_2 \end{aligned} \right\} (16)$$

其中, k_1 和 k_2 分别表示视角1和视角2的观测时刻。分别对视角1与视角2两维轨迹进行圆属性拟合, 估计的圆心位置分别表示为 c_1 和 c_2 。则视角2的雷达视角可以表示为

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{c_1 - c_2 \cos \Delta \theta}{c_2 \sin \Delta \theta} \right) \quad (17)$$

假设对视角2进行3D重构, 令 $\theta = \theta_2$, 则缩放系数 $\xi = 1/\sin \theta$ 代入式(15)即可将 Γ_2 转化为 Γ_1 。而如何准确寻找两个视角散射点轨迹的圆心是转化的关键, 由于前面分析得到, 散射点轨迹中心总是位于点 $(0, z_q \cos \theta)$ 。所以在对2维轨迹进行圆拟合时只需要估计半径 r_q 和距离向中心位置 c_q 即可, 则圆轨迹拟合优化函数可以表示为

$$\min F(r_q, c_q) = \sum_{k=1}^K \left(\left\| r_q \sin(wt_k + \varphi_q) + c_q - R_{k,q} \right\| + \left\| r_q \cos(wt_k + \varphi_q) - D_{k,q} \right\| \right) \quad (18)$$

其中, $\varphi_q = \begin{cases} \text{atan}(R_{o,q}/D_{o,q}), & R_{o,q} > 0 \\ \text{atan}(R_{o,q}/D_{o,q}) + \pi, & R_{o,q} < 0 \end{cases}$ 通过全局搜索优化过程, 利用式(18)求解结果进行轨迹拟合

$$\left. \begin{aligned} \hat{R}_{k,q} &= r_q \sin(wt_k + \varphi_q) + c_q \\ \hat{D}_{k,q} &= r_q \cos(wt_k + \varphi_q) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

则通过拟合得到距离向与方位向轨迹表示为 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 和 $\hat{\mathbf{D}}_k$, 其中 $\hat{R}_{k,q}$ 与 $\hat{D}_{k,q}$ 分别表示 $\hat{\mathbf{R}}_k$ 和 $\hat{\mathbf{D}}_k$ 的第 q 个元素。因此, 由此拟合得到的 Γ_2 转化为 Γ_1 的过程如式(20)

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{r}_k \\ \mathbf{d}_k \end{bmatrix}}_{\Gamma_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \xi \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{R}}_k \\ \hat{\mathbf{D}}_k \end{bmatrix}}_{\Gamma_2} \quad (20)$$

将得到的 Γ_1 代入式(8)即可得到目标的3D重构结果。

4 算法总结

经过以上分析, 本文所提空间目标3D重构算法分为3部分, 算法流程如图4所示。

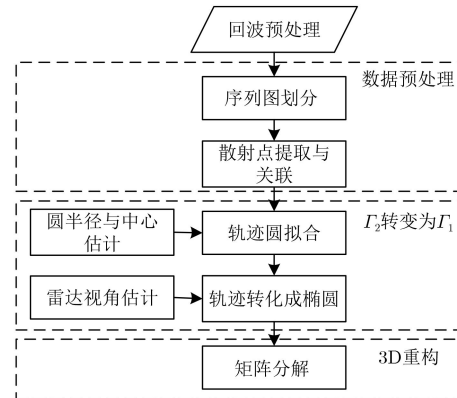


图4 算法流程图

首先数据预处理部分主要对原始回波进行运动补偿, 得到转台目标模型的回波信号。对转台模型信号进行有重叠的子孔径划分处理, 获得雷达序列图, 然后对序列图进行散射点提取与关联。子孔径划分原则应以相邻子孔径散射点位置变化不超过两个采样单元为提前, 否则散射点将很难进行正确关联, 不利于精确的3D重构。

第2部分是轨迹曲线 Γ_2 向 Γ_1 的转化。经过散射点关联, 得到目标上散射点的运动轨迹 Γ_2 。需要注意的是, 雷达检测结果与几何投影的结果 Γ_1 是不一样的。雷达检测的轨迹 Γ_2 可以用圆参数, 即圆心、半径和相位描述, 而几何投影的结果 Γ_1 是用椭圆参数描述的, 椭圆参数包括椭圆中心、长轴、短轴和

相位。采用最小二乘法对雷达检测的轨迹 T_2 进行2维圆拟合, 获得其圆参数。另一方面, 椭圆曲线 T_1 可以通过对圆曲线 T_2 的方位向乘以缩放系数 ξ 获得。缩放系数 ξ 的计算需要通过两个不同视角的相同散射点轨迹的圆心位置的分析, 采用式(17)计算其雷达视角 θ , 而缩放系数 $\xi = 1/\sin\theta$ 。至此, 便完成了轨迹曲线 T_2 向 T_1 的转化。由于首先进行圆属性拟合, 虽然目标转角大小变化, 但其圆属性参数是一致的。所以不需要目标有很大的转角, 只要圆属性参数估计准确, 第3部分的重构精度不受影响。

第3部分为基于矩阵分解的3D重构过程, 曲线 T_1 的2维轨迹按照一定的规律组成轨迹矩阵 M , 对 M 进行奇异值分解, 并对分解结果添加投影矩阵的约束条件, 才能获得目标3D结构, 具体矩阵分解求解过程在文献[8-11]中均有详细分析。

5 仿真验证

为了验证所提算法的有效性, 本文采用如图5(a)散射点模型表示固定尾翼的导弹目标进行仿真, 模型目标有5个散射点, 形成圆锥形。实验中的相关参数如表1所示。

图5(b)是对图5(a)模型进行点散射模型的雷达回波仿真结果, 在图5(b)中的曲线是根据检测后进行圆拟合的轨迹曲线。从图5(b)中可见, 圆拟合的

结果与雷达仿真结果一致。图5(c)将从雷达回波中提取的轨迹与圆拟合的轨迹进行了对比。由于提取过程波动的不大, 图5(c)中难以观测到, 在图5(d)中对图5(c)中矩形区的结果进行了局部放大, 由噪声引起的波动在图5(d)得到了放大并明显可见。

对于空间目标, 视角差越小, 需要时间越短, 越能保证两个视角中, 目标转轴方向的不变性, 这样估计的雷达视角才有意义。下面就不同雷达视角差的耗时与3D重构估计结果进行对比。当空间目标位于2000 km高空, 以速度6797 m/s的速度运行, 假设需要估计与雷达视角为 45° 时不同视角差为 5° , 3° 和 2° 情况的视角估计与重构情况。表2给出了3种视角差情况需要的时间, 2° 时需要21.29 s是可以接受的, 而情况1需要56.42 s, 对于空间高速目标, 长时间可能会导致目标转轴方向已经发生明显改变。

为了检测本文算法的稳定性与性能, 进行了500次蒙特卡罗实验, 并与McFadden的方法进行了

表1 实验参数

参数	数值	参数	数值
带宽(GHz)	2	相邻子孔径相差($^\circ$)	0.66
雷达视角($^\circ$)	45	目标转速(rad/s)	0.07
雷达重复频率(Hz)	600	子孔径大小($^\circ$)	4
信噪比(dB)	5	目标转轴	Z轴

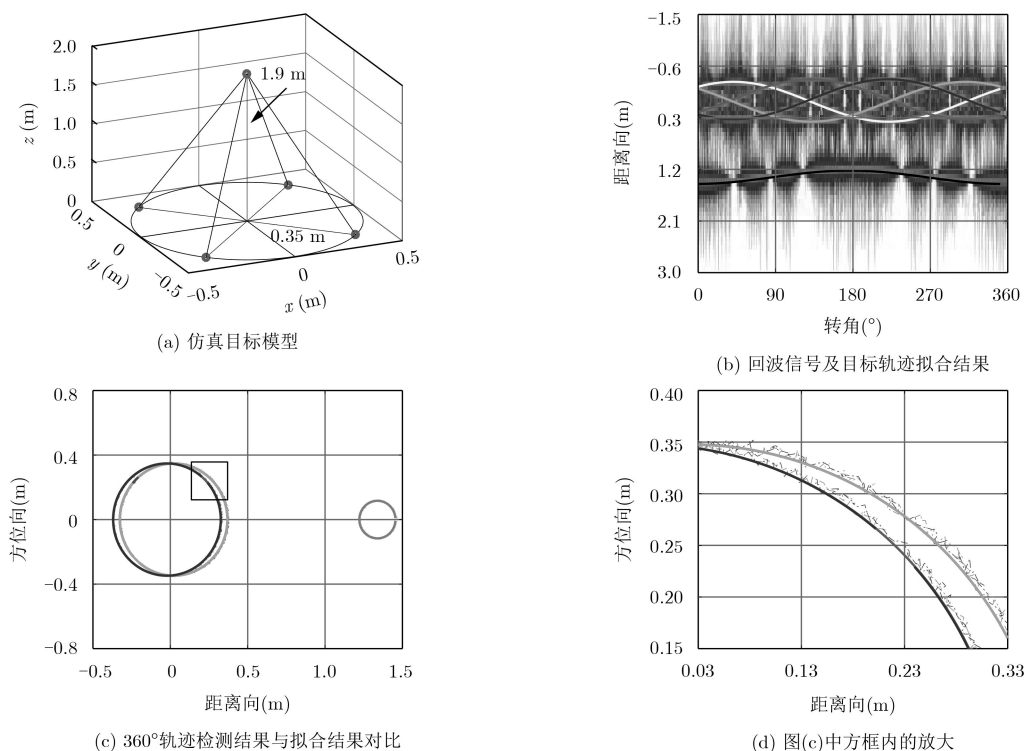


图5 轨迹处理结果对比

表 2 不同雷达视角差对应时长

情况	1	2	3
$\Delta\theta(^{\circ})$	5	3	2
耗时(s)	56.42	32.55	21.29

对比。图6是3种情况估计精度展示，估计误差采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)进行评估，具体为

$$E[\bar{u}] = \sqrt{\frac{1}{NP} \sum_n \sum_p (\bar{u}_{n,p} - u_p)^2} \quad (21)$$

其中， p 标示参数下标， P 表示参数个数， n 表示实验次数下标， N 表示实验总次数， $E[\bar{u}]$ 表示估计量的均方根误差， $\bar{u}_{n,p}$ 表示第 n 次实验估计的第 p 个参数， u_p 表示第 p 个参数的真值。为了清楚表现出圆轨迹拟合与椭圆转换结果与理论的一致性，在两个视角差 2° 时，图6(a)和图6(b)是为目标旋转 46° 的理论轨迹曲线与通过圆属性拟合的曲线和转化的椭圆曲线对比结果。图6(a)和图6(b)是根据 Γ_1 曲线和 Γ_2 曲线性质的分析结果，其中虚线都表示理论分析的结果，实线表示实验估计结果，置于同一图中进行对比，不同类型的曲线代表不同散射点的轨迹。图6(a)是根据关联的轨迹进行圆心与半径估计后根据方位向以0为中心的性状进行拟合后的结果。图6(a)中拟合的轨迹与理论轨迹完全重合。经过视角的估计，将 Γ_2 曲线转变为 Γ_1 曲线，如图6(b)所示，其理

论值与拟合后的 Γ_1 曲线也完全重合。图6(c)是3种情况下雷达视角估计精度，横坐标表示目标旋转的角度，从 $6^{\circ} \sim 46^{\circ}$ 的估计精度基本没有变，由于本文估计雷达视角用的是从轨迹中估计的圆心位置，所以雷达视角的估计精度基本不受目标转角的影响，但是两个视角差越大，视角估计精度越高，但耗时也越长。图6(d)是3种情况下3D重构估计精度，目标转角依然从 $6^{\circ} \sim 46^{\circ}$ ，3D重构估计精度随着目标转角增大，估计精度稍微有些下降，但之后趋于不变，基本在0.016 m以下，3D重构精度基本不随转角变化。视角差逐渐增大时，目标3D重构精度也逐渐上升。

图7是用McFadden方法进行500次蒙特卡罗实验的3D重构的精度，实验中，有时会因轨迹关联方位向误差较大，只能利用距离向信息进行3D重构，使得精度有所下降，甚至3D重构算法失败。将失败的试验次数去掉后，形成图7的实验结果。从图7(a)中可见，在目标转角小于 50° 时，McFadden方法重构精度在0.087 m以上，增大目标转角的情况下，其重构精度会逐渐提高，比如，图7(b)是图7(a)中矩形框内曲线的局部放大结果，从 150° 之后，McFadden的方法重构精度在0.01 m以下，此时和本文所提方法精度相当。

图6(d)与图7(a)相对比，可以发现McFadden的方法严重依赖于目标转角的大小，随着目标转角增大，目标3D重构精度逐渐上升，但是转角

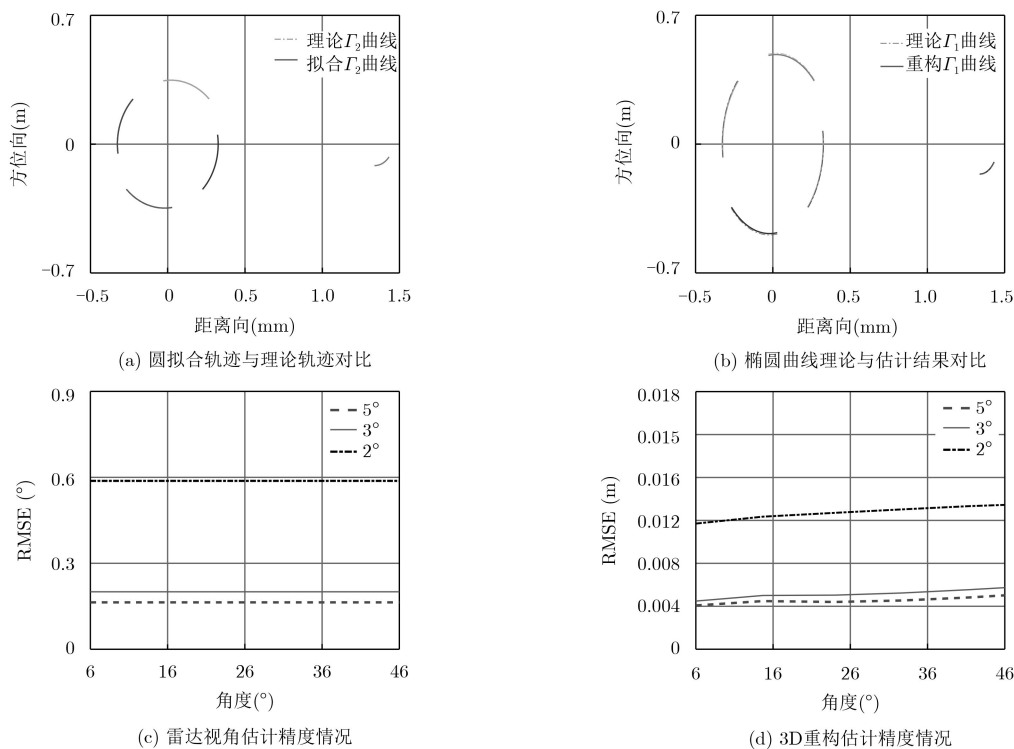


图 6 对3种情况估计精度对比

较小时, 比如图7(a)中 50° 以内, 重构精度比较差。与之相反的是, 本文算法由于首先对目标轨迹进行圆拟合, 通过多视角将圆轨迹转化为椭圆轨迹的方法, 使得本文方法不受实验目标转角大小的影响, 在较小的角度时, 只要圆拟合精度高, 都可以获得高精度的3D重构结果。图8是两种方法进行3D重构

结果对比, 其中点表示重构的目标, 菱形表示真实目标。图8(a)是McFadden方法在 6° 时的重构结果, 图中明显可见重构散射点与目标真实位置偏离严重。图8(b)是McFadden方法在 180° 时的重构结果, 图8(c)是本文方法在 6° 时的重构结果。3D重构结果对比与图6、图7实验性能展示基本一致。

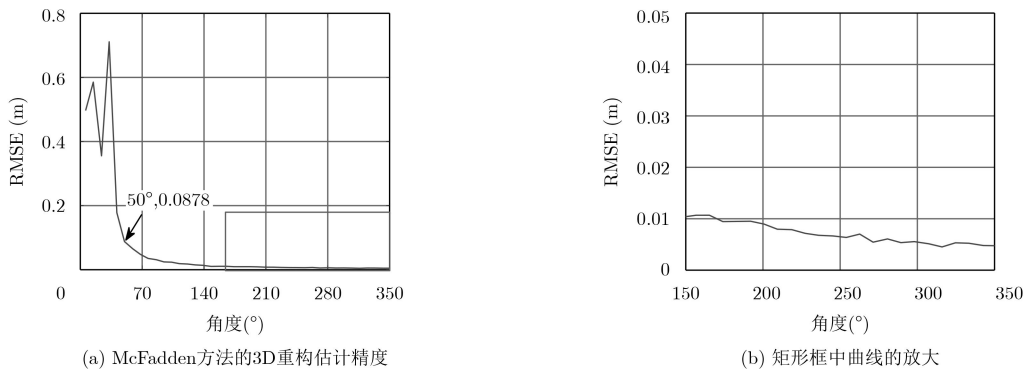


图7 McFadden方法的评估结果

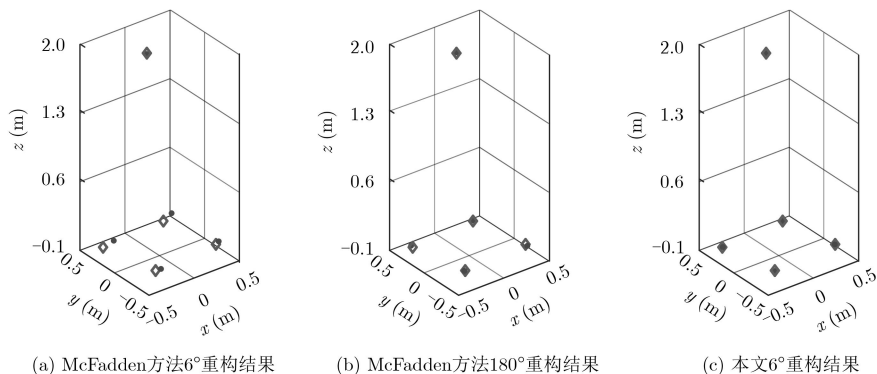


图8 目标重构结果对比

6 结束语

本文所提短时间的空间自旋目标3D几何重构算法, 首先对关联的目标散射点轨迹进行圆属性拟合, 减少对方位向轨迹检测的依赖性。通过多视角估计的缩放系数, 将圆属性轨迹转化为椭圆属性轨迹, 使得本文方法不依赖于实验目标转角的大小, 相对于传统3D重构方法, 本文所提方法在较小的转角下都可以获得高精度的3D重构结果。由于采用转角较小, 需要定标的子图较少。另一方面, 因为对轨迹进行圆属性拟合, 对方位向定标要求不高, 不需要很高精度的定标算法, 进一步降低计算量。在未来研究中, 可以在连续时间内, 通过本文所提的短时3D重构算法, 对运动中目标连续进行3D重构, 通过姿态估计获得目标运动规律, 进一步为目标识别等应用做准备。

参考文献

- [1] PATE-CORNELL E and SACHON M. Risks of particle hits during space walks in low earth orbit[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(1): 134–146. doi: 10.1109/7.913673.
- [2] SATO T. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(2): 1000–1005. doi: 10.1109/36.752218.
- [3] WANG Qi, XING Mengdao, LU Guangyue, et al. SRMF-CLEAN imaging algorithm for space debris[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(12): 3524–3533. doi: 10.1109/TAP.2007.910343.
- [4] NING Yu, BAI Xueru, ZHOU Feng, et al. Method for inverse synthetic aperture radar imaging of space debris using improved genetic algorithm[J]. *IET Radar, Sonar &*

- Navigation*, 2017, 11(5): 812–821. doi: [10.1049/iet-rsn.2016.0048](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2016.0048).
- [5] XU Gang, XING Mengdao, XIA Xianggen, *et al.* 3D geometry and motion estimations of maneuvering targets for interferometric ISAR with sparse aperture[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(5): 2005–2020. doi: [10.1109/TIP.2016.2535362](https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2535362).
- [6] WU Wenzhen, HU Pengjiang, XU Shiyong, *et al.* Image registration for InISAR based on joint translational motion compensation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(10): 1597–1603. doi: [10.1049/iet-rsn.2017.0140](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2017.0140).
- [7] MAYHAN J T, BURROWS M L, CUOMO K M, *et al.* High resolution 3D “snapshot” ISAR imaging and feature extraction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 630–642. doi: [10.1109/7.937474](https://doi.org/10.1109/7.937474).
- [8] MCFADDEN F E. Three-dimensional reconstruction from ISAR sequences[J]. *SPIE*, 2002, 4744: 58–67.
- [9] LIU Lei, ZHOU Feng, BAI Xueru, *et al.* Joint cross-range scaling and 3D Geometry reconstruction of ISAR targets based on factorization method[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2016, 25(4): 1740–1750. doi: [10.1109/TIP.2016.2526905](https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2526905).
- [10] WANG Feng, XU Feng, and JIN Yaqiu. Three-dimensional reconstruction from a multiview sequence of sparse ISAR imaging of a space target[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 611–620. doi: [10.1109/TGRS.2017.2737988](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2737988).
- [11] LIU Lei, ZHOU Feng, and BAI Xueru. A modified EM algorithm for ISAR scatterer trajectory matrix completion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(7): 3953–3962. doi: [10.1109/TGRS.2018.2817650](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2817650).
- [12] 段佳, 张磊, 邢孟道, 等. 合成孔径雷达目标特征提取新方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 13–19. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003).
- DUAN Jia, ZHANG Lei, XING Mengdao, *et al.* Novel feature extraction method for synthetic aperture radar targets[J]. *Journal of Xidian University*, 2014, 41(4): 13–19. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2014.04.003).
- [13] DING Baiyuan, WEN Gongjian, HUANG Xiaohong, *et al.* Data augmentation by multilevel reconstruction using attributed scattering center for SAR target recognition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(6): 979–983. doi: [10.1109/LGRS.2017.2692386](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2692386).
- [14] OH S, RUSSELL S, and SASTRY S. Markov chain Monte Carlo data association for multi-target tracking[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(3): 481–497. doi: [10.1109/TAC.2009.2012975](https://doi.org/10.1109/TAC.2009.2012975).
- [15] GRANSTRÖM K, SVENSSON L, REUTER S, *et al.* Likelihood-based data association for extended object tracking using sampling methods[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2018, 3(1): 30–45. doi: [10.1109/TIV.2017.2788184](https://doi.org/10.1109/TIV.2017.2788184).
- 徐丹: 女, 1990年生, 博士, 研究方向为ISAR关系, 3维成像.
符吉祥: 男, 1992年生, 博士, 研究方向为ISAR成像.
孙光才: 男, 1984年生, 副教授, 研究方向为新体制雷达, 雷达成像, 动目标成像.
邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 研究方向为SAR/ISAR成像、动目标检测等.
苏涛: 男, 1968年生, 教授, 研究方向为面向雷达、声纳、通信的高速实时信号处理.
保铮: 男, 1927年生, 中国科学院院士, 研究雷达与信号处理方面的理论与工程实践.