

基于刚体几何不变性的雷达目标运动 路径拟合和三维优化重建方法

张颖康¹ 肖 扬¹ 马晓涛²

(1. 北京交通大学 信息科学研究所 北京 100044; 2. 河北软件职业技术学院 保定 河北 071000)

摘要: 对于飞机、船舰等刚体雷达目标,其在运动过程中具有空间几何不变性。利用这一约束条件,可以通过雷达回波中提取出的目标散射点的一维距离史重建出目标的三维形状和运动路径。鉴于现有的基于几何不变性的雷达目标三维重建算法存在鲁棒性差的问题,本文利用雷达目标的运动惯性,对初步重建后得到的目标运动路径进行了拟合,并利用拟合后的运动路径对目标散射点的三维坐标进行了优化重建。文中对重建的误差进行了分析,提出了仿射扰动和欧式重建误差的误差模型。仿真实验证明,经仿射匹配校正后的拟合路径与真实路径基本吻合,从而可以有效获得目标的运动特征;同时,利用本文提出的优化重建方法能够有效抑制目标的欧式重建误差,提高了重建算法的准确性。

关键词: 几何不变性; 雷达三维成像; ISAR; 三维重建; 路径拟合

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)09-1371-08

Motion Path Fitting and 3-D Optimal Reconstruction Method of Radar Target Based on Geometry Invariance of Rigid Object

ZHANG Ying-kang¹ XIAO Yang¹ MA Xiao-tao²

(1. Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. HeBei Software Institute, Baoding, Hebei, 071000, China)

Abstract: For some rigid targets of radar, such as aircrafts and ships, they hold the properties of geometry invariance during the motions. With this constraint, the 1-D range histories of the scatterers extracted from the radar echo signals can be applied to reconstruct the 3-D shape and the motion of the target. Considering to the poor robustness of the existing radar 3-D reconstruction algorithm based on geometry invariance, the motion inertia of the radar target is utilized in this paper to fit the motion path and via which the 3-D coordinates of the scatterers of the target are reconstructed optimally. Furthermore, the reconstruction error models are analyzed in this paper and the models of affine perturbation and Euclid reconstruction error are proposed. The simulation experiments verify that, after the affine matched correction, the fitted motion path is basically consistent with the real path so that the target's motion features can be obtained efficiently. Meanwhile, the Euclid reconstruction error can be suppressed effectively with the optimal reconstruction proposed in this paper implemented and, as a result, the accuracy of the reconstruction can be improved.

Key words: Geometry invariance; Radar 3-D imaging; ISAR; 3-D reconstruction; Path fitting

1 引言

传统的逆合成孔径雷达(ISAR)通常仅具有二维分辨能力,其利用大带宽信号获得目标高分辨率的纵向距离像,同时利用目标上各散射点和雷达视线间的相对转动实现目标的横向距离高分辨^[1]。与雷达平台匀速运动的 SAR 系统相比,ISAR 系统中目标的运动参数为未知的,为实现目标横向距离的聚焦,通常需要目标的转动

限制在二维平面内^[2]。由于 ISAR 横向像仅为散射点投影在二维转动平面上的多普勒信息,其不能反映目标的真实尺寸,因此实际中需要对目标转角进行估计,以实现横向定标^[3]。现有的 ISAR 二维成像方法中,如^[4,5],其大多数都是基于目标三次加速以下二维转动的假设。然而实际中,目标通常具有三维转动,如高机动的飞机以及在海面上颠簸的舰船,由于目标上各个散射点的运动规律随散射点的位置而变化,难以用统一的函数进行运

收稿日期: 2009 年 12 月 22 日; 修回日期: 2010 年 3 月 31 日

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60572093), 教育部博士点基金资助项目(No. 20050004016), 北京交通大学优秀博士生创新研究基金(No. 141095522)。

动补偿,从而使重建的图像模糊;另外,由于目标上高度不同的散射点在变化的转动平面上的多普勒投影会产生偏移,从而使成像发生畸变失真^[6]。因此,实际中还需要对成像时间进行选择,选取较好的二维转动时段,以及适宜目标识别的成像投影平面^[7,8]。

相对于二维图像,雷达目标的三维结构和运动路径能够提供更丰富的信息,雷达三维成像技术对于目标的探测和识别具有重要的意义。现有 ISAR 三维成像技术包括干涉 ISAR^[9,10]和“快拍”成像^[11]等:前者利用两个或三个天线,通过二维像间的干涉相位差别提取散射点的三维空间信息;后者利用一个接收天线在不同观测角得到的二维成像序列构建目标的三维图像。两种算法从不同角度增加了空间自由度来获取目标的三维信息,但由于需要多个天线或要进行多次成像,因此同时也增加了算法的复杂性。近期人们对于自旋物体三维成像算法进行了研究^[12],此算法利用了物体自旋产生额外自由度的已知条件进行三维成像,因此无法适用于一般目标的三维成像问题。

对于普遍的雷达目标,如飞机、舰船、导弹和空间碎片等,均可视为刚体,其在运动过程中均具有几何不变性(GI, Geometry Invariance)。空间几何不变量已在计算机视觉中得到广泛应用^[13],相对于计算机视觉中三维目标在成像平面上的二维投影,雷达探测的信息为三维目标在雷达视线方向上的一维投影,利用刚体目标的几何不变性这一约束条件,可以对目标的三维结构和运动信息进行估计。文献[14]首次将基于GI的三维重建方法引入雷达三维成像领域,称之为三维运动和几何信息系统(3D MAGI);近些年文献[15-16]利用因子分解法对此算法进行了改进。此算法相对于传统的雷达二维和三维成像方法具有以下优点:

- (1) 仅需要雷达回波信号原始数据,不需要任何雷达平台和目标运动的信息。
 - (2) 可适用于雷达目标的任意三维运动,不需要对目标的相对运动进行任何限制和假设。
 - (3) 能够重建出目标的实际三维结构和三维运动信息,不存在尺度模糊。
- 鉴于以上的诸多优点,此方法在雷达目标的探测和识别方面均具有很好的应用前景。

然而,由于此重建方法需要首先对每次回波中散射点的距离位置进行提取和关联^[17],因此散射点距离提取的精度直接影响到重建算法的准确性。限于雷达系统有限的距离分辨率,以及雷达回波干涉现象的影响,提取出的散射点位置势必存在一定的误差。另外,此方法也受到目标三维运动“丰富性”的影响,由于雷达目标的散射特性具有各向异性^[18],其有效孔径角度一般较小,在观测期间目标运动被限制在很小的转角内,因此对重建算法的鲁棒性具有较高的要求。目前的算法仅限于应用空间几何不变性这一约束条件对目标运动路径和三

维坐标进行最小二乘估计,由于目标的三维坐标和运动路径具有旋转多义性^[15],从而难以对重建结果进行非线性最优化。因此算法对于散射点距离原始数据的精度具有较大的依赖性,算法的鲁棒性较差。

本文提出了一种基于刚体几何不变性(GI)的雷达目标运动路径拟合和三维优化重建方法。文中首先给出了由仿射重建到欧式重建的重建过程,然后对三维重建后的误差模型进行了分析。鉴于现有算法仅利用重建结果与实际目标的欧式距离作为误差标准的局限性,本文提出了欧式重建误差和仿射扰动两种重建误差模型。为提高重建算法的准确性,本文充分考虑到实际中的雷达目标(如飞机、舰船等)具有较大的运动惰性这一约束条件,对初步重建出的目标三维运动路径进行了曲线拟合,并且利用拟合后的路径进一步对目标的三维坐标进行了优化重建。仿真实验中,针对不同的散射点距离误差和三维转角幅度,对初步重建和本文的优化重建的仿射扰动和欧式重建误差进行了量化分析。实验结果证明,利用本文的方法得到的拟合路径经仿射匹配校正后与真实路径基本吻合,因此在相差一个仿射变换的意义下,可以有效地获得真实路径的基本运动特征。同时实验证明,与现有的重建算法相比,利用本文提出的优化重建方法在不同的散射点距离误差和三维转角幅度的情况下均能有效地抑制目标的欧式重建误差,因此提高了重建算法的准确性。

2 雷达刚体目标几何不变性模型

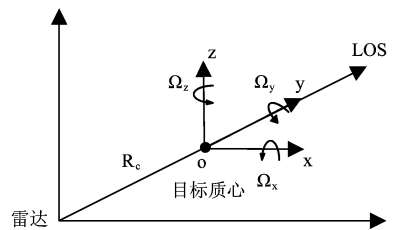


图1 雷达刚体目标空间几何模型

雷达刚体目标空间几何模型如图1所示。不失一般性,将雷达刚体目标置于以其质心为原点的欧式坐标系 $oxyz$ 中,其中坐标系的 y 轴与雷达视线(LOS)方向平行,目标绕三个坐标轴的旋转矢量分别为 $[\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z]$ 。设目标上 N 个散射点中第 i 个散射点在 t 时刻的三维坐标为 $X_i(t) = [x_i(t), y_i(t), z_i(t)]^T$,则在远场平面波的假设下,其雷达测距 $\rho_i(t)$ 为 $X_i(t)$ 在 LOS 上的一维距离投影,即 $\rho_i(t) = R_c(t) + y_i(t)$,其中 R_c 为目标质心与雷达的距离,其有 $R_c(t) = \sum_{k=1}^N \rho_k(t) / N$ 。为去除目标平移运动 $R_c(t)$ 的影响,可以对 $\rho_i(t)$ 进行如下的归零消去,使目标只具有三维纯转动模型,

$$\check{\rho}_i(t) = \rho_i(t) - \sum_{k=1}^N \rho_k(t) / N \quad (1)$$

$\check{\rho}$ 即为散射点在 y 方向上的一维距离投影。由目标几

何模型可知,目标旋转矢量 Ω_x 不改变 $\tilde{\rho}$,目标的有效旋转矢量仅为 Ω_x 和 Ω_z ,设两者在 t 时刻的旋转角度分别为 $\alpha(t)$ 和 $\theta(t)$ 。假设0时刻两旋转角均为0,且散射点的三维坐标为 $X_i = [x_i, y_i, z_i]^T$,则其在 t 时刻的一维距离投影 $\tilde{\rho}_i(t)$ 有

$$\tilde{\rho}_i(t) = X_i^T \cdot c(t) \quad (2)$$

其中 $c(t)$ 为目标三维转动的运动路径向量,其有以下形式,

$$\begin{aligned} c(t) &= [c_1(t), c_2(t), c_3(t)]^T \\ &= [\sin\theta(t)\cos\alpha(t), \cos\theta(t)\cos\alpha(t), -\sin\alpha(t)]^T \end{aligned} \quad (3)$$

由(3)可知,

$$c^T(t) \cdot c(t) = c_1^2(t) + c_2^2(t) + c_3^2(t) = 1 \quad (4)$$

此式即反映了刚体目标的几何不变性。

当获得一段连续时间内雷达回波经匹配滤波后的原始数据后,经过对散射点一维距离的提取和关联,可以得到目标上 N 个散射点在 L 个回波内的一维距离数据 $\rho_i(t_j) \quad i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, L$ 。经(1)式的归零消去后可构造 $N \times L$ 的一维距离投影矩阵: $\phi =$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\rho}_1(t_1) & \tilde{\rho}_1(t_2) & \dots & \tilde{\rho}_1(t_L) \\ \tilde{\rho}_2(t_1) & \tilde{\rho}_2(t_2) & \dots & \tilde{\rho}_2(t_L) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{\rho}_N(t_1) & \tilde{\rho}_N(t_2) & \dots & \tilde{\rho}_N(t_L) \end{bmatrix}; \text{ 设 } N \times 3 \text{ 的目标三维}$$

坐标矩阵和 $3 \times L$ 的运动路径矩阵分别为 $S = [X_1^T \ X_2^T \ \dots \ X_N^T]^T$ 和 $C = [c(t_1) \ c(t_2) \ \dots \ c(t_L)]$,则由(2)式可建立下式,

$$\phi = S \cdot C \quad (5)$$

同时,根据(4)式的几何不变性,可以得出以下约束条件,

$$\text{diag}(C^T C) = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times L}^T \quad (6)$$

3 基于几何不变性的雷达目标三维重建

3.1 由仿射重建到欧式重建的重建模型

上述雷达目标的三维重建问题即为利用雷达回波中提取出的一维距离投影矩阵 ϕ ,通过(5)和(6)式求解目标的三维坐标 S 和运动路径 C 。 S 和 C 中的未知参数共有 $3N + 3L$ 个,利用(5)和(6)式可建立 $NL + L$ 个方程,方程可解的条件为 $NL + L > 3N + 3L$ 。

在(5)式的约束下 S 和 C 的解不唯一,其存在仿射多义性,即存在任一仿射变换矩阵 M ,使 $S_A = SM$ 和 $C_A = M^{-1}C$ 依然满足 $\phi = S_A \cdot C_A$ 。由此可知,仅利用(5)式的约束只能够得到目标的一簇仿射重建结果 S_A 和 C_A ,其与 S 相差一个 3×3 的仿射变换矩阵 M 。对 M 进行奇异值分解(SVD)可得

$$M = R \Sigma_M O^T \quad (7)$$

其中 R, O 为 3×3 的正交矩阵, Σ_M 为 M 的特征值矩阵。由此可知,对于满足(5)式的某一仿射重建结果 $S_A = SM$,其关于实际的 S 存在着任一旋转变换 (R, O)

和尺度拉伸 (Σ_M) 。

根据(6)式的几何不变性,可以对上述目标的任一仿射重建结果 $C_A = M^{-1}C$ 进行约束。有

$$\begin{aligned} C^T C &= C_A^T M^T M C_A = C_A^T O \Sigma_M^{-1} R^T R \Sigma_M^{-1} O^T C_A \\ &= C_A^T O \Sigma_M^{-2} O^T C_A = C_A^T W C_A \end{aligned} \quad (8)$$

其中 3×3 的对称矩阵 $W = O \Sigma_M^{-2} O^T$ 可以利用最小二乘法由(6)和(8)式线性求解出,从而得到 $R^T M = \Sigma_M O^T$ 。由此可以得到目标以下形式的欧式重建结果,

$$S_E = S_A (R^T M)^{-1} = SR, C_E = R^T M C_A = R^T C \quad (9)$$

此欧式重建结果 S_E 和 C_E 与实际的 S 和 C 相差一个旋转变换 R ,因此存在着旋转多义性。

由此可知,上述雷达目标的三维重建方法可归结为以下步骤:

- (1) 由一维距离投影矩阵 ϕ 找到任一组满足(5)式的仿射重建结果 S_A 和 C_A ;
- (2) 由(6)式的几何不变性,利用(8)式对仿射变换矩阵 M (相差一个旋转变换 R)进行最小二乘估计;
- (3) 利用(9)式将仿射重建上升到欧式重建 S_E 和 C_E 。

3.2 基于因子分解的三维重建方法

文献[14]首次提出一种基于GI的雷达刚体目标重建算法。近些年文献[15]利用因子分解法对此方法进行了改进,其首先采用奇异值分解(SVD)法对秩为3的一维距离投影矩阵 ϕ 进行了如下因子分解:

$$\phi = V \Sigma U^T \quad (10)$$

其中, V, U 和 Σ 分别为 ϕ 降秩后的左右特征向量矩阵和特征值矩阵。文献[15]中利用 ϕ 与 S 的列能够张成相同子空间的性质,对 S 进行代换,即 $S = VM$,其中 M 为一未知的 3×3 矩阵。 M 矩阵的求解可由(6)式的约束得到,即由(5)和(10)式可得

$$\begin{aligned} C^T C &= \phi^T S (S^T S)^{-2} S^T \phi \\ &= U \Sigma (M M^T)^{-1} \Sigma U^T = U \Sigma W \Sigma U^T \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $W = (M M^T)^{-1}$ 为 3×3 对称矩阵。由(6)式可建立 L 个方程,即

$$\text{diag}[C^T C] = \text{diag}(U \Sigma W \Sigma U^T) = [1, 1, \dots, 1]_{L \times 1} \quad (12)$$

重排 W 上三角6个元素,即 $w = [W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{22}, W_{23}, W_{33}]^T$,利用最小二乘法对(12)式求解得到 w ,从而得到矩阵 W 。对 W 进行SVD,

$$W = V_w \Sigma_w V_w^T \quad (13)$$

则可得 $M = V_w \Sigma_w^{-1/2} O$,其中 O 为任意正交矩阵。从而可以得到目标的欧式重建结果为

$$S_E = VM, C_E = M^{-1} \Sigma U^T \quad (14)$$

纵观上述基于因子分解的重建方法,其实质上符合了3.1节所述的由仿射重建到欧式重建基本过程。此方法利用对一维距离投影矩阵 ϕ 的奇异值分解,找到一组仿射重建结果,即 $S_A = V, C_A = \Sigma U^T$ 。再根据几何不变性约束,求解仿射变换矩阵 M ,将仿射重建上升为欧式重建。另外,文献[16]中用类似的方法得到了另一种仿射重建结果,即 $S_A = V \Sigma, C_A = U^T$,两者的方法基本相同。

4 误差分析和评判标准

由第3节可知,由于具有旋转多义性(9)式,雷达目标的欧式重建结果 S_E 和 C_E 存在多解情况,若采用非线性最优化方法对(5)和(6)式的约束进行最优化,则优化变量无法收敛。因此,算法对于由一维距离数据构成的一维距离投影矩阵 ϕ 具有较大的依赖性,当原始数据具有较大误差或不充分时,重建的准确性将很难保证。

实际中影响重建结果的因素可以归结为两类。第一类为目标散射点距离位置提取误差:实际中散射点中心位置的提取精度受到雷达纵向距离分辨率的限制(如300MHZ带宽,其最小分辨单元为0.5米),另外雷达回波的干涉现象以及散射点关联的错误都势必会造成一维距离投影矩阵 ϕ 的误差。第二类影响重建结果的因素为雷达目标在观测时间内三维运动的“丰富性”:当目标接近二维转动时, ϕ 的秩变为2,因此只能重建出目标散射点的二维投影位置。因此,目标与雷达的相对三维转动是三维重建的必要条件,并且转动的幅度越大,则重建结果越准确。然而由于散射点的散射具有各向异性,其有效的孔径角度一般较小,因此在观测期间目标运动一般限制在很小的角度范围内,这极大地限制了重建算法的鲁棒性。

本文对重建算法的误差模型进行了分析。在不存在误关联的情况下,目标散射点距离位置提取误差一般限制在分辨率级别,其可视为围绕真实位置分布的高斯分布噪声,因此实际得到的一维距离投影矩阵形式为

$$\tilde{\phi} = \phi + \Delta\phi \quad (15)$$

其中 $\Delta\phi$ 为噪声矩阵。经过对 $\tilde{\phi}$ 的奇异值分解可得到 \tilde{V} 和 $\tilde{\Sigma}\tilde{U}^T$ 两个矩阵。如第3.2节的因子分解法可知,其中 \tilde{V} 被用来作为 S 的一个仿射重建估计,而 $\tilde{\Sigma}\tilde{U}^T$ 用来对仿射变换矩阵 M 进行估计。由于 $\tilde{\phi}$ 存在误差,则 \tilde{V} 和 $\tilde{\Sigma}\tilde{U}^T$ 都会产生误差,其导致重建结果两种误差模型的产生:

(1) \tilde{V} 的误差导致 S 的仿射重建估计具有加性误差模型,即

$$\tilde{S}_A = \tilde{V} = V + \Delta V \quad (16)$$

(2) $\tilde{\Sigma}\tilde{U}^T$ 的误差导致估计出的仿射变换矩阵 \tilde{M} 具有误差,这里将其近似表示成乘性误差

$$\tilde{M} = M \cdot \Delta M \quad (17)$$

因此利用含误差的 \tilde{V} 和 \tilde{M} 对 S 和 C 进行欧式重建后的结果为

$$\tilde{S}_E = \tilde{V}\tilde{M} = (V + \Delta V)M\Delta M = (S_E + \Delta S_E) \cdot \Delta M \quad (18a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{C}_E &= \tilde{M}^{-1}\tilde{\Sigma}\tilde{U}^T = \Delta M^{-1}M^{-1}(\Sigma U^T + \Delta\Sigma U^T) \\ &= \Delta M^{-1} \cdot (C_E + \Delta C_E) \end{aligned} \quad (18b)$$

这里称 ΔS_E 和 ΔC_E 为欧式重建误差,两者使重建出的目标三维坐标和运动路径偏离真实位置; ΔM 导致的误差被称为仿射扰动,其使重建出的目标三维坐标在正交的某三个方向具有不同的尺度变化,使重建目标的形状拉伸,目标运动路径也会有相应的变化。欧式重建误差会使重建的目标轮廓产生模糊,对于后续的雷达目标识别具有较大影响;仿射扰动只使目标变形,但不改变目标的相对外形特征,较小的仿射扰动对重建目标的识别影响较小,但尺度信息会受到一定影响。

现有的基于GI的雷达目标三维重建算法中^[14-16],均将重建后的目标坐标与真实坐标旋转对准后的欧式距离作为描述重建误差的标准。然而,由于实际中存在仿射扰动,导致重建后目标坐标存在尺度拉伸,造成重建结果与真实目标坐标的欧式距离变化很大,从而仅利用欧式距离作为误差标准评价重建算法的准确度存在一定的不合理性。本文分别建立了基于上述提出的两种重建误差模型的误差评判标准。通过仿真实验,在已知原始目标三维坐标 S_0 和运动路径 C_0 的情况下,可以对重建后的结果进行仿射匹配校正,即使 \tilde{S}_E 与 S_0 在旋转和尺度上对准后,计算两者的欧式重建误差和仿射扰动两种误差情况,从而评判重建算法的准确性。

以第3.2节所述的因子分解法重建结果 \tilde{S}_E 和 \tilde{C}_E 为例,由于存在仿射扰动, \tilde{S}_E 与目标实际的三维坐标矩阵 S_0 在最小二乘意义下有 $\tilde{S}_E = S_0\Delta M$,则可求得相匹配的仿射扰动矩阵

$$\Delta M = (S_0^T S_0)^{-1} S_0^T \tilde{S}_E \quad (19)$$

利用求出的 ΔM 可以对 \tilde{S}_E 和 \tilde{C}_E 分别进行如下的仿射匹配校正

$$\bar{S}_E = \tilde{S}_E \Delta M^{-1}, \bar{C}_E = \Delta M \tilde{C}_E \quad (20)$$

\bar{S}_E 和 \bar{C}_E 即为仿射匹配校正后的三维坐标和运动路径。对 ΔM 进行SVD,得到 $\Delta M = R \Sigma_{\Delta M} O^T$ 。在不存在仿射扰动的情况下, ΔM 的尺度($\Sigma_{\Delta M}$ 中的三个特征值)均为1,即 $\text{diag}(\Sigma_{\Delta M}) = [1, 1, 1]^T$ 。因此可以利用 $\text{diag}(\Sigma_{\Delta M})$ 与 $[1, 1, 1]^T$ 的欧氏距离 $d_{\Delta M}$ 来描述仿射扰动情况,即

$$d_{\Delta M} = \left\| \text{diag}(\Sigma_{\Delta M}) - [1, 1, 1]^T \right\|_2 \quad (21)$$

$d_{\Delta M}$ 反映了重建坐标存在有仿射扰动导致的尺度误差的大小。

仿射匹配校正后,可以利用 \bar{S}_E 与 S_0 中各散射点三维坐标的欧式距离的平均和 d_s 作为欧式重建误差的评价标准,设 \bar{S}_E 与 S_0 中对应的第 i 个散射点的三维坐标分别为 \bar{X}_i 和 X_i ,则有

$$d_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\| \bar{X}_i - X_i \right\|_2 \quad (22)$$

d_s 反映了重建坐标存在欧式重建误差的大小。

5 基于路径拟合的优化重建

如第 4 节所述,由于受到诸多因素的影响,实测的一维距离投影矩阵 $\tilde{\phi}$ 通常含有误差,由此造成重建后目标三维坐标和运动路径偏离真实值,导致目标轮廓难以识别,同时也无法得到目标精确的运动信息。本文考虑到实际雷达目标(如飞机、舰船等)通常具有较大的运动惰性,在雷达脉冲重复频率(PRF)远大于目标运动路径随时间变化的最高频率的情况下(现有 ISAR 系统通常可以满足),目标相对于雷达的三维转动路径通常为较平滑的曲线。因此,将目标转动路径参数 $\alpha(t)$ 视为沿时间 t 方向的高次曲线是一种较合理的假设。本文利用基于 GI 的雷达目标三维重建方法对目标三维坐标 S 和运动路径矩阵 C 进行初步重建后,对 C 中的三个行向量分别进行了曲线拟合,并利用拟合后的 C 对目标三维坐标 S 进行了优化重建,从而可以有效降低 S 的欧式重建误差。另外,由于对 C 拟合后可以得到目标转动路径参数的估计,因此对于传统 ISAR 成像方法的观测时段选择、转角估计和运动补偿,均可提供有效的目标运动辅助信息。

5.1 路径拟合

受到分辨率和雷达回波干涉等因素的影响,目标散射点距离提取误差可视为围绕真实位置高斯分布的误差,因此由第 3.2 节所述的因子分解重建方法得到的 \tilde{C}_E 中各行向量 $\tilde{c}_1(t), \tilde{c}_2(t), \tilde{c}_3(t)$ 沿 t 方向呈围绕真实路径曲线的弥散分布。由于舰船和飞机等目标的运动存在较大惰性,在现有的 ISAR 系统的 PRF 下,通常可以保证目标的运动轨迹为较平滑的曲线。由于散射点有效孔径角度一般较小,因此在较短观测期间目标运动路径一般可以用有限次的高次多项式进行逼近。

利用第 3 节所述的重建方法可以得到目标初步重建后的三维坐标 \tilde{S}_E 和运动路径矩阵 $\tilde{C}_E = [\tilde{c}_1(t), \tilde{c}_2(t), \tilde{c}_3(t)]^T$, 设用 m 次多项式分别对 $\tilde{c}_1(t), \tilde{c}_2(t), \tilde{c}_3(t)$ 进行如下拟合,使 $\hat{c}_i(t)$ 逼近曲线 $\tilde{c}_i(t)$,

$$\hat{c}_i(t) = a_{i0} + a_{i1}t + \dots + a_{im}t^m, \quad i = 1, 2, 3 \quad (23)$$

其中 a_{ij} 为 $\hat{c}_i(t)$ 多项式 j 次项的系数。令

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ t_1 & t_2 & \dots & t_L \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ t_1^m & t_2^m & \dots & t_L^m \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{10} & a_{11} & \dots & a_{m1} \\ a_{20} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{30} & a_{31} & \dots & a_{m1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据 (23) 式建立如下方程式

$$A \cdot T = \tilde{C}_E \quad (25)$$

则矩阵 A 可以用如下的最小二乘方法求解

$$A = (T^T T)^{-1} T^T \tilde{C}_E \quad (26)$$

由此可以得到拟合后的运动路径矩阵 \hat{C}_E 有如下形式

$$\hat{C}_E = A \cdot T = (T^T T)^{-1} T^T \tilde{C}_E \quad (27)$$

5.2 优化重建

经过 5.1 节对运动路径矩阵的曲线拟合,可以有效减小 \tilde{C}_E 的误差方差。因此利用 \hat{C}_E 逆向求解目标的三维坐标,可以进一步优化目标的重建结果。

设原始一维距离投影矩阵为 $\tilde{\phi}$, 根据 (5) 式,优化后目标的三维坐标 \hat{S}_E 可由下式得到,

$$\hat{S}_E = \tilde{\phi} \hat{C}_E^T (\hat{C}_E \hat{C}_E^T)^{-1} \quad (28)$$

由 (18) 式的误差模型可知,对 \tilde{C}_E 的曲线拟合能够有效去除 \tilde{C}_E 的加性误差 ΔC_E , 经 (28) 式的优化重建可以有效地降低目标的欧式重建误差。然而此算法不能很好的纠正重建后的仿射扰动矩阵 ΔM , 优化后的 \hat{S}_E 仍受到仿射扰动的影响。在现有的三维目标识别技术中,可以利用目标模板对具有尺度拉伸的重建目标进行仿射匹配识别,因此一定程度上可以消除仿射扰动的影响。由于本文的优化重建方法可以有效地降低目标重建的欧式重建误差,其使重建目标的轮廓变得清晰,因此对于后续的目标识别等工作具有一定的价值。

由此总结本文提出的基于 GI 的雷达目标运动路径拟合和三维优化重建方法的主要步骤为:

- (1) 提取和关联雷达 L 次回波中 N 个散射点的一维距离式 $\rho_i(t)$, 并利用 (1) 式对其进行归零消去, 得到 $N \times L$ 的一维距离投影矩阵 $\tilde{\phi}$;
- (2) 对 $\tilde{\phi}$ 进行 SVD 分解 $\tilde{\phi} = V \Sigma U^T$;
- (3) 根据 (12) 式建立关于 W 上三角 6 个元素的 L 个方程, 得到矩阵 W 的最小二乘估计;
- (4) 对 W 进行 SVD 分解 $W = V_w \Sigma_w V_w^T$, 得到仿射变换矩阵 $M = V_w \Sigma_w^{-1/2}$;
- (5) 得到目标初步重建后的三维坐标和运动路径矩阵分别为 $\tilde{S}_E = VM$ 和 $\tilde{C}_E = M^{-1} \Sigma U^T$;
- (6) 选取拟合曲线多项式的最高项次数 m , 构建 (24) 式中的 T 矩阵。
- (7) 对 \tilde{C}_E 进行如 (26) 式的拟合, 拟合后的运动路径矩阵为 $\hat{C}_E = (T^T T)^{-1} T^T \tilde{C}_E T$;
- (8) 对目标初步欧式重建的三维坐标 \tilde{S}_E 进行优化重建, 得到 $\hat{S}_E = \tilde{\phi} \hat{C}_E^T (\hat{C}_E \hat{C}_E^T)^{-1}$ 。

6 仿真实验

6.1 模型仿真

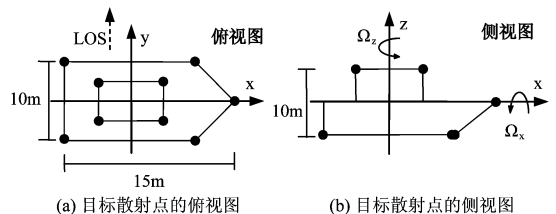


图 2 船舶模型

本节利用仿真实验对本文提出的基于 GI 的雷达目标路径拟合和三维优化重建方法进行实验分析。模拟实际中船舶的三维形状,仿真实验中设置了 9 个规则分布的散射点,其所描述的船舶模型的尺寸、坐标以及三维转动方向均由图 2 给出,目标与雷达的纵向距离设为 $R_0=1000m$,使其基本满足雷达远场平面波的假设。通常船舶在海面颠簸所产生的三维转动可以等效为图 2(b)所示的两个有效转动矢量 Ω_x, Ω_z 的矢量和。

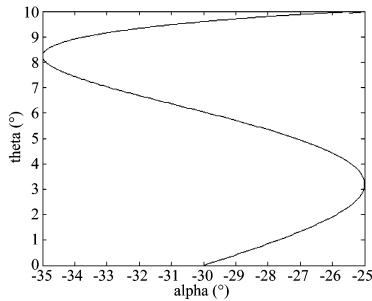


图3 目标三维转动路径

根据文献[19]的描述,船舶在海面上的三维转动角度 $\alpha(t)$ 和 $\theta(t)$ 具有类似正弦函数的运动轨迹,这里设其具有以下加速正弦函数的运动路径,

$$\alpha(t) = A_1 \sin(2\pi(w_1 t + a_1 t^2) + \varphi_1) \quad (29a)$$

$$\theta(t) = A_2 \sin(2\pi(w_2 t + a_2 t^2) + \varphi_2) \quad (29b)$$

其中 A_1, A_2 为角度转动幅度; w_1, w_2 和 a_1, a_2 分别为角度转动频率和频率加速度; φ_1, φ_2 为角度转动初相。图 3 给出了一组基于上述转动模型的运动路径,其在两个角度上的转动幅度均为 10° 。

实际中需要经过对匹配滤波后的雷达回波数据中的散射点进行提取和关联,得到散射点的一维距离史。实验中采用仿真的方式根据(2)式,得到 9 个散射点在 150 个雷达回波中的距离位置。经如(1)式的归零消去后,可以得到理想的散射点的一维投影矩阵 ϕ_0 。实际中散射点距离位置误差 $\Delta\rho$ 主要受到雷达纵向分辨率 Δr 和雷达回波干涉的影响,其可视为加性的高斯白噪声,噪声方差范围可设为分辨率 Δr 等级。实验中,在 ϕ_0 中添加一定方差的高斯白噪声来模拟实测的一维距离投影矩阵 $\tilde{\phi}$ 。以 300MHz 的雷达带宽为例,则雷达纵向分辨率为 $\Delta r=0.5m$ 。图 4 给出 9 个散射点理想的一维距离史曲线和添加了方差为 0.5m 的高斯白噪声后的一维距离史曲线。

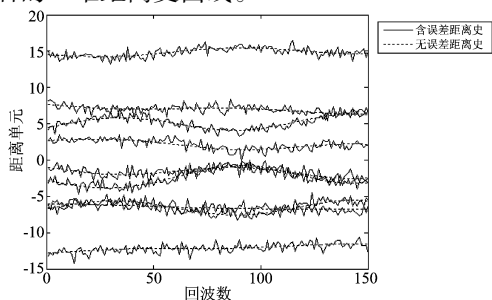


图4 散射点的一维距离史

6.2 初步重建和优化重建结果

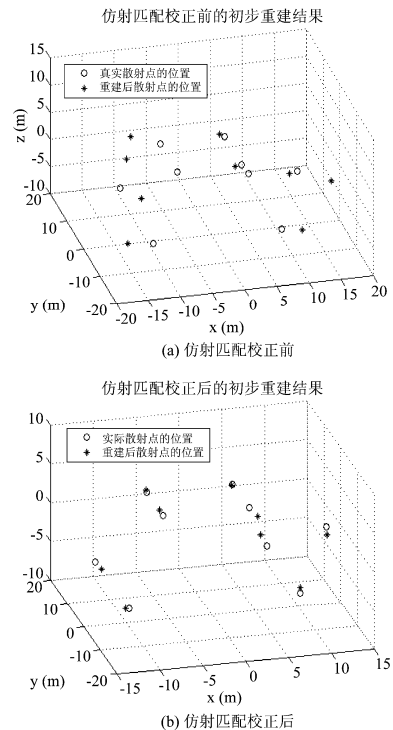


图5 仿射匹配校正前后的初步重建结果与真实目标比较

实验中首先利用第 3.2 节所述的因子分解法得到初步重建结果 \tilde{S}_E 和 \tilde{C}_E , 并利用第 4 节所述的方法对 \tilde{S}_E 进行了仿射匹配校正,并对初步重建结果 \tilde{S}_E 仿射匹配校正前后的三维坐标进行了比较。

图 5 中的(a)和(b)图分别给出了散射点距离误差方差取为 0.5m,目标转角幅度取为 10° 时,初步重建结果 \tilde{S}_E 仿射校正前后的散射点与真实散射点的空间位置((a)图的散射点仅经过了旋转校正)。由图 5(a)可以看出,由于存在着仿射扰动,重建后的散射点坐标在尺度上存在一定程度的拉伸,但仍保留着目标的外形结构特征;图 5(b)反映了初步重建的欧式重建误差,由图中可以看出,各散射点均不同程度地偏离了真实位置,导致目标轮廓模糊。由此可以证明,本文第 4 节提出的重建误差模型具有一定的合理性。

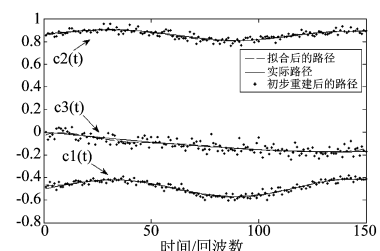


图6 目标运动路径

利用本文提出的方法,对上述初步重建后的运动路径 \tilde{C}_E 进行了拟合,得到拟合路径 \hat{C}_E , 拟合曲线选择

了6次的拟合多项式。图6给出了 \tilde{C}_E 和 \hat{C}_E 经仿射匹配校正后的三个行向量($c_1(t)$ 、 $c_2(t)$ 和 $c_3(t)$)与实际路径的比较。由图6可知,初步重建后的运动路径为弥散分布的,其存在较大的误差;而仿射匹配校正后的拟合路径 \hat{C}_E 与实际路径基本吻合。由此可以证明,本文的拟合路径方法能够有效降低目标运动路径的欧式重建误差,拟合后的路径在相差一个仿射变换的意义下保持了真实路径的基本特征。

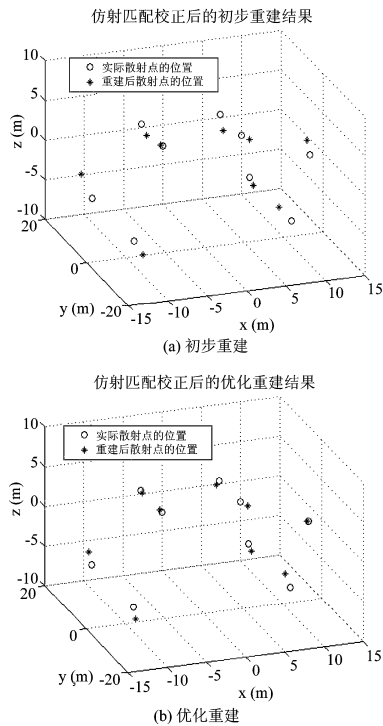


图7 仿射匹配校正后的初步重建与优化重建结果

利用拟合后的路径 \hat{C}_E ,按照本文提出的方法对目标进行了优化重建,得到优化重建后的三维坐标 \hat{S}_E 。图7(a)和(b)图分别给出了一组散射点距离误差方差为0.5m,目标转角幅度为5°的初步重建与优化重建后的目标三维坐标,其三维坐标均经过了仿射匹配校正。由图7所示,仿射匹配校正后,优化重建后的散射点位置(图7(b))较初步重建(图7(a))更接近真实位置。由此可以证明,本文提出的优化重建方法能够有效地降低重建的欧式重建误差。

6.3 初步重建和优化重建结果的误差量化分析

本文在不同的散射点距离误差和目标转角幅度的情况下,对初步重建和本文的优化重建的仿射扰动和欧式重建误差情况进行了量化分析。实验中,目标的转角幅度范围选取为5°-15°,散射点距离误差方差的范围选取为0.5m-1.5m。对于每种情况分别对上述两种方法进行了100次重建。按照第4节所述的评价标准,对于两种方法的每一次重建分别计算出了重建结果的仿射扰动尺度误差 d_s (参见(21)式),以及欧式

距离误差 d_s (参见(22)式)。

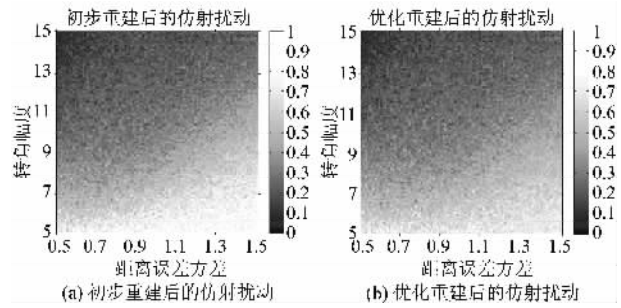


图8 初步重建和优化重建后的仿射扰动比较

图8给出了初步重建和优化重建后的仿射扰动的比较,图中横纵坐标分别代表不同的距离误差方差和转角幅度,图像的灰度值代表着其所对应情况下100次重建结果的仿射扰动尺度误差 $d_{\Delta M}$ 的平均值(图像灰度进行了归一化)。从图8可以看出,目标的仿射扰动在普遍情况下都存在很大的随机性,由此可验证重建中对于仿射变换矩阵 M 的估计存在鲁棒性差的问题,致使仿射扰动对于误差比较敏感。从总体趋势上看,目标的仿射扰动会随着散射点距离误差的减小,特别是转角幅度的增大而减小。图中两种重建方法的仿射扰动现象基本相同,由此看出目标的三维运动对于 M 的估计具有较大的影响,实际中需要增加重建数据中目标三维运动的“丰富性”,从而降低目标重建的仿射扰动。

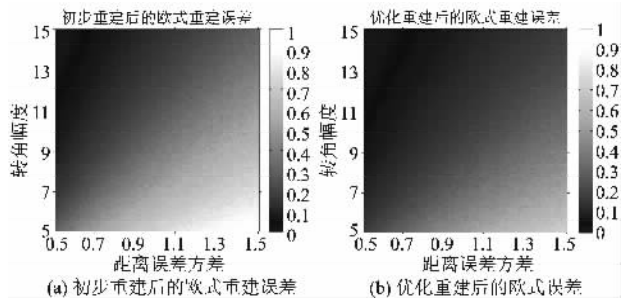


图9 初步重建和优化重建后的欧式重建误差比较

图9给出了初步重建和优化重建后的欧式重建误差的比较,图像的灰度值代表了其所对应情况下100次重建结果的欧式重建距离误差 d_s 的平均值。从图9可以看出,目标的欧式重建误差随着距离误差的减小以及转角幅度的增大而逐步减小。与初步重建相比,本文的优化重建方法在普遍的情况下均能够有效地降低重建的欧式重建误差。由此可以证明,本文提出的优化重建方法对于提高重建的准确性具有一定的效果。

7 结束语

本文对基于几何不变性的雷达刚体目标三维重建算法进行了改进,利用雷达目标的运动惰性,对初步重建后得到的运动路径进行了拟合,并利用拟合的路径对目标的三维坐标进行了优化重建。文中对重建的误

差进行了分析,提出了重建结果的仿射扰动和欧式重建误差的误差模型,并对两种误差的评价标准进行阐述。仿真实验显示,经仿射匹配校正后的拟合路径与真实路径基本吻合,因此一定程度上体现了目标的运动特征,能够为现有的 ISAR 二维和三维成像方法提供辅助的目标运动信息。实验中,对初步重建和本文提出的优化重建结果进行了比较,实验结果证明,在不同的距离误差和转角幅度情况下,本文提出的优化重建方法能有效地降低目标的欧式重建误差,因此一定程度上提高了重建算法的准确性。

另外,由于实际中雷达目标散射点的有效观测孔径较小,因此在重建中选取的目标转角幅度受到了限制,由此导致重建过程中仿射变换矩阵 M 的求解鲁棒性较差,造成重建结果的仿射扰动,使重建目标的尺度存在一定程度的拉伸,降低了重建结果的直观性。因此,如何在目标大转角幅度情况下进行重建,以及有效降低重建结果的仿射扰动,将有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京,电子工业出版社,2005: 229-275.
- [2] Li J. , Ling H. , Chen V. C. . An algorithm to detect the presence of 3D target motions on ISAR Imaging [J]. SPIE Processing on Radar Processing, Technology, and Applications, 1999, 3810: 139-148.
- [3] 李玺,顾红,刘国岁. ISAR 成像中转角估计的新方法[J]. 电子学报,2000.
- [4] Bao Z. , Wang G. Y. , Xing M. D. Time-Frequency approaches to ISAR imaging of maneuvering targets and their limitations [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(3): 1091-1099.
- [5] Chen V. C. , Ling H. . Joint time-frequency analysis for radar signal and image [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999, 16(2): 81-93.
- [6] 罗琳,保铮. 目标多维转动对逆合成孔径雷达成像的影响[J]. 西安电子科技大学学报,1997.
- [7] Pastina D. , Montanari A. . Motion estimation and optimum time selection for ship ISAR imaging [C]. IEEE Radar Conference Proceedings, 2003, 7-14.
- [8] 韩兴斌,胡卫东,郁文贤. 基于散射点信号特性的 ISAR 成像时间选择算法 [J]. 信号处理,2007, 23(5): 704-709.
- [9] Wang G. Y. , Xia X. G. , Chen V. C. . Three dimensional ISAR imaging of maneuvering targets using three receivers [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001 10(3): 436-448.
- [10] Xu X. J. , Narayanan R. M. . Three dimensional interferometric ISAR imaging for target scattering diagnosis and modeling [J]. IEEE Transactions on Image Processing

2001, 10(7): 1094-1102.

- [11] Mayhan J. T. , Burrows M. L. , Cuomo K. M. . High resolution 3D snapshot ISAR imaging and feature extraction [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2001, 37(2): 630-641.
- [12] Qi W. , Xing M. , Lu G. , Bao Z. . High-resolution three-dimensional radar imaging for rapidly spinning targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 22-30.
- [13] Hartley R. , Zisserman A. . Multiple view geometry in computer vision [M]. Cambridge University Press, 2000.
- [14] M. A. Stuff, P. Sanchez, M. Biancala. Extraction of three-dimensional motion and geometric invariants [J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2003, 14: 161-181.
- [15] Ferrara M. , Arnold G. , Stuff M. . Shape and motion reconstruction from 3D-to-1D orthographically projected data via object-image relations [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2009, 31(10): 1906-1912.
- [16] 周剑雄. 光学区雷达目标三维散射中心重构理论与技术[D]. 长沙,国防科技大学研究生院,2008: 64-66.
- [17] 刘永祥,吕玉增,黎湘,庄钊文. 多姿态角下的目标散射中心关联与成像方法研究[J]. 信号处理,2008, 24(2): 168-171.
- [18] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005: 230-274.
- [19] Wehner D. R. . High resolution radar [M]. Artech House, 1995, 408-411.

作者简介



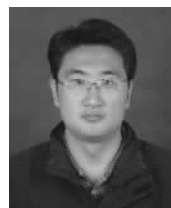
张颖康(1982-),男,北京交通大学在读博士研究生,主要研究方向为计算机视觉和雷达信号处理。

E-mail: dakang_828@163.com



肖扬(1955-),男,博士,教授,北京交通大学博士生导师。主要研究方向为空时信号处理,多维信号处理。

E-mail: yangxiao0513@163.com



马晓涛(1983-),男,河北软件职业技术学院教师,主要研究方向信号处理和嵌入式系统开发。

E-mail: dean_maxt@hotmail.com