

非合作雷达目标散射中心关联和三维重建算法

张颖康* 肖扬 胡绍海

(北京交通大学信息科学研究所 北京 100044)

摘要: 针对非合作雷达目标 3 维重建技术中各未知视角下 1 维散射中心难以关联的问题, 该文提出了一种基于几何约束的散射中心关联方法。此方法通过对反投影误差的检验实现了对部分可靠散射中心的自动选择和有效关联。同时, 利用由已关联散射中心距离数据估计出的目标运动参数, 实现目标上更多散射中心的关联和 3 维重建。仿真实验证明, 该文提出的算法能够适用于 1 维散射中心存在缺失点、虚假点和重叠点的复杂情况, 有效增强了未知运动目标散射中心关联和重建的鲁棒性。

关键词: 雷达 3 维成像; 3 维散射中心; 散射中心关联; 非合作目标

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)09-2076-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01449

Method of Scattering Centers Association and 3D Reconstruction for Non-cooperative Radar Target

Zhang Ying-kang Xiao Yang Hu Shao-hai

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: For the problem of associating the 1D scattering centers at unknown viewing angles existed in the technique of non-cooperative radar target 3D reconstruction, a method of scattering centers association based on geometric constraint is proposed. In the method, a part of reliable scattering centers are automatically selected and effectively associated via checking the back-projection error. Meanwhile, with the motion parameters estimated from the range data of the associated scattering centers, more scattering centers on the target can be associated and reconstructed. The simulations verify that, the proposed algorithm is applicable to the complex situations where missing, fault and overlapping points existed in the 1D scattering centers, and the robustness of the scattering centers association and reconstruction for unknown moving target can be effectively enhanced.

Key words: Radar 3D imaging; 3D scattering centers; Scattering centers association; Non-cooperative radar target

1 引言

随着电子战的迅猛发展, 对于如隐形武器等复杂雷达目标的探测和识别显得尤为重要。由于雷达目标在高频区的电磁散射可以由多个孤立的散射中心所表征, 因此构建目标的多散射中心模型成为分析目标散射特性和进行目标识别的更直接、简洁的手段^[1]。随着雷达目标 1 维和 2 维散射中心提取技术的相继成熟, 对目标散射中心的 3 维成像成为雷达目标自动识别领域中有待进一步解决的问题^[2]。现阶段对雷达目标散射中心的 3 维诊断通常限于室内电磁环境中进行, 其根据雷达远场条件下的几何投影关系, 由多个可控姿态下 1 维散射中心的距离数据重建出目标散射中心的 3 维模型^[3-5]。

现有对于外场雷达目标的 3 维成像技术主要

采用多天线干涉的方式(如InSAR和InISAR等)^[6,7], 而这些方法通常需要雷达平台或目标具有合作的运动模式^[8,9]。现有技术中涉及到一些单天线雷达 3 维成像方法, 如圆周运动SAR系统对地面目标的 3 维成像^[10], 以及ISAR系统对于自旋物体的 3 维成像^[11]等, 这类方法均采用了雷达平台或目标的特定运动, 无法适用于具有任意未知运动雷达目标的 3 维成像。针对此问题, 文献[12]首次基于刚体目标的几何不变性约束, 利用目标 3 维运动中多个散射中心的 1 维距离史实现了对目标结构和运动的几何重构。近年来人们针对此技术提出了一些改进的方法^[13-15]。与传统干涉成像方法不同, 此技术属于 1 维到 3 维的几何重构方法, 其不需要任何雷达平台和目标运动的预知信息, 因此对于非合作雷达目标的自动识别和运动估计具有较高的应用价值。

实际中, 随着雷达目标的 3 维运动, 目标上不同空间分布的散射中心在雷达视线上的投影位置会发生变化, 因此, 如何对雷达各未知视角下的 1 维散射中心进行准确的关联成为上述技术中的瓶颈问

2010-12-31 收到, 2011-04-28 改回

国家自然科学基金(60572093), 教育部博士点基金(20050004016)和北京交通大学优秀博士生创新研究基金(141095522)资助课题

*通信作者: 张颖康 dakang_828@163.com

题。现有对于 1 维散射中心的关联方法大致可以分为两类: 第 1 类为已知目标姿态下的关联方法, 此类方法通常应用于室内可控姿态下的电磁实验环境中, 其根据 3 维到 1 维的投影几何关系, 利用 Hough 变换实现对 1 维散射中心的关联, 并通过分析 Hough 变换域的能量分布情况估计出目标散射中心的空间位置^[4,5]。第 2 类则为对未知运动目标散射中心的关联方法, 由于姿态参数完全未知, 因此常利用其他辅助信息建立散射中心间的关联关系。其中, 文献[16]利用雷达高脉冲重复频率(PRF)回波探测下目标运动的连续性, 采用 LMS 滤波器对散射中心进行跟踪, 并配合参照散射中心的幅度、类型等辅助信息实现对散射中心的关联。然而, 实际中散射中心的强度随视角变化会具有一定的起伏, 并且不同散射中心的徙动轨迹会发生重叠或遮挡情况, 因此极易产生跟踪错误。而一旦发生错误关联, 算法无法对其自行纠正, 从而无法保证最终重建结果的准确性。

考虑到上述问题, 本文构建出一种非合作雷达目标散射中心关联和 3 维重建系统。在此系统中, 本文针对雷达目标未知运动下散射中心难以关联的问题, 提出一种基于几何约束的散射中心关联算法, 此方法通过对反投影误差的检验实现了对关联方案有效性的判断, 同时算法建立了递归决策机制, 保证了 1 维散射中心关联的准确性。系统中, 首先采用此关联算法对目标上部分可靠散射中心进行了选取和关联, 之后利用由已关联散射中心距离数据估计出的目标运动参数, 实现了对目标上更多散射中心的关联和 3 维重建。本文通过仿真实验模拟了实际中 1 维散射中心存在缺失点、虚假点和重叠点的复杂情况, 并对以上算法的有效性进行了验证。

2 未知运动雷达目标 3 维重建模型

图1(a)给出了本文算法的一种应用背景, 其中地基单天线雷达对具有任意 3 维转动的目标进行连续视角回波探测。采用现有 ISAR 成像技术中的距离对准方法^[17], 可以去除目标平移运动的影响, 得到目标纯旋转运动下的距离像序列。利用现有的 1 维散射中心提取方法^[18,19], 可以提取出各次回波中多个 1 维散射中心的投影距离位置(如图1(b)所示)。

雷达目标纯旋转运动下的空间几何模型如图2所示。其中, 在雷达远场平面波的假设下, 目标上散射中心的雷达测距等效为其在雷达视线(LOS)方向上的投影距离。假设已提取和关联出目标上 N 个散射中心在 L 次回波中的投影距离数据 ρ_{ij} ($i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, L$), 由此可以构建如下形式的投影距离矩阵,

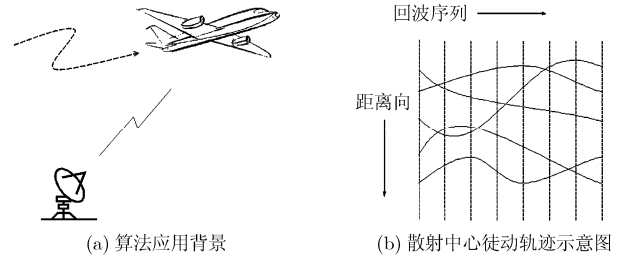


图1 算法应用实例

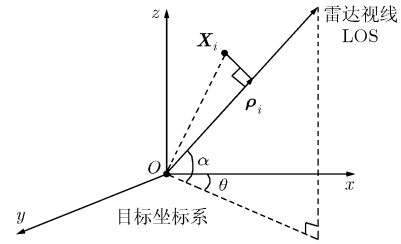


图2 雷达目标的几何模型

$$\varphi = [\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_L] \quad (1)$$

其中 $\rho_j = [\rho_{1j}, \rho_{2j}, \dots, \rho_{Nj}]^T$ 为第 j 次回波中 N 个散射中心的投影距离向量。设雷达视角的方位角和俯仰角分别为 θ_j 和 α_j , 则坐标为 $\mathbf{X}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 的散射中心的投影距离 ρ_{ij} 满足以下投影几何关系,

$$\rho_{ij} = \mathbf{X}_i \cdot \mathbf{c}_j = x_i C_{1j} + y_i C_{2j} + z_i C_{3j} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{c}_j = [C_{1j}, C_{2j}, C_{3j}]^T$ 为目标在第 j 次回波时刻的雷达视角向量, 由几何关系可推出其有以下形式,

$$\mathbf{c}_j = [\sin \theta_j \cos \alpha_j, \cos \theta_j \cos \alpha_j, \sin \alpha_j]^T \quad (3)$$

对于刚体目标, \mathbf{c}_j 为单位矢量, 其具有以下约束,

$$\mathbf{c}_j^T \mathbf{c}_j = C_{1j}^2 + C_{2j}^2 + C_{3j}^2 = 1 \quad (4)$$

设由 N 个散射中心的 3 维坐标 \mathbf{X}_i 构成的 $N \times 3$ 的矩阵为 $\mathbf{S} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_N]^T$; 由 L 次回波中目标视角向量 \mathbf{c}_j 构成的 $3 \times L$ 的矩阵为 $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_L]$, 则根据式(2)和式(4)可得到以下两个约束条件,

$$\varphi = \mathbf{S}\mathbf{C} \quad (5)$$

$$\text{diag}(\mathbf{C}^T \mathbf{C}) = \mathbf{1}_{L \times 1} \quad (6)$$

由此可知, 给定一投影距离矩阵 φ , 可以在式(5)和式(6)的共同约束下, 对目标散射中心的 3 维坐标 \mathbf{S} 和目标的运动参数 \mathbf{C} 进行 3 维几何重构:

由于矩阵 φ 的秩为 3, 基于矩阵 φ 降秩后的奇异值分解(SVD) $\varphi = \mathbf{V}_r \Sigma_r \mathbf{U}_r^T$, 可首先在式(5)的约束下, 得到目标的一组仿射重建结果^[20], 即

$$\mathbf{S}_A = \mathbf{V}_r, \quad \mathbf{C}_A = \Sigma_r \mathbf{U}_r^T \quad (7)$$

其中 \mathbf{S}_A 和 \mathbf{C}_A 的解具有仿射多义性, 即存在任一 3×3 仿射变换矩阵 \mathbf{M} , 可使 $\mathbf{S}_A = \mathbf{S}\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{C}_A = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C}$ 依然满足式(5)条件, 即 $\varphi = \mathbf{S}_A \mathbf{C}_A$ 。其次, 引入式(6)的约束条件, 可对 \mathbf{S}_A 和 \mathbf{C}_A 与 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 之间

相差的仿射变换矩阵 \mathbf{M} 进行最小二乘估计^[13-15]。最后, 可将目标的仿射重建上升为欧式重建^[20], 即

$$\mathbf{S}_E = \mathbf{S}_A \mathbf{M}^{-1}, \quad \mathbf{C}_E = \mathbf{M} \mathbf{C}_A \quad (8)$$

其中 \mathbf{S}_E 和 \mathbf{C}_E 具有旋转多义性, 其与 \mathbf{S} 和 \mathbf{C} 相差任一旋转变换, 即存在任一正交矩阵 \mathbf{R} , 可使 $\mathbf{S}_E = \mathbf{S} \mathbf{R}^T$ 和 $\mathbf{C}_E = \mathbf{R} \mathbf{C}$ 依然满足式(5)条件, 即 $\varphi = \mathbf{S}_E \mathbf{C}_E$ 。

以上得到的 \mathbf{S}_E 和 \mathbf{C}_E 中蕴含了散射中心和目标运动相差任一旋转角度意义下的全部 3 维信息。

3 非合作雷达目标散射中心关联和 3 维重建算法

实际中, 随着目标未知的 3 维运动, 目标上不同空间位置的散射中心投影到各视角上的投影位置排列顺序会发生改变, 因此对于 1 维散射中心进行正确关联是进行 3 维重建的前提条件和难点问题。第 2 节中所述的重建算法需要预先在各次回波中提取并关联出完整的 N 个散射中心, 然而实际中对外场目标散射中心的关联会存在以下诸多复杂的情况:

- (1) 大尺寸外场目标一般具有较多的散射中心, 由此增加了散射中心关联的复杂性和运算量;
- (2) 受到外界噪声和杂波的干扰, 预先在距离像中提取出的 1 维散射中心可能存在虚假的冗余点;
- (3) 随着目标相对雷达视线角的变化, 雷达距离像中易出现散射中心合并、遮挡等现象, 由此导致回波序列中的 1 维散射中心会存在部分缺失;
- (4) 实际中目标散射中心的频率响应会存在差异, 并且存在非理想点的散射中心类型(如展布型等)^[21], 这些因素最终会导致预先提取出的 1 维散射中心存在虚假点、缺失点或距离位置具有较大偏差。

鉴于上述问题, 本文构建了一种适用于上述复杂情况下的非合作雷达目标散射中心关联和 3 维重建系统。以下对该系统中采用的基于几何约束的关联算法以及系统的具体实施方法进行详细阐述。

3.1 基于几何约束的部分可靠散射中心关联算法

实际中在目标有限的转角范围内, 目标上通常会存在部分在各次回波中均存在可靠距离数据点的散射中心。基于这一事实, 本文提出的关联算法着眼于对目标上部分可靠散射中心的选取和关联。

假设预先在各回波中对 1 维散射中心进行了提取, 这里忽略其强度、类型、相位等信息, 仅采用其距离数据 ρ_{ij} ($i=1, \dots, n_j; j=1, \dots, L$), 其中 n_j 为第 j 次回波中 1 维散射中心的数量。这里假设目标上存在可靠散射中心的数目为 N' ($3 \leq N' \leq \min_{j=1, \dots, L}(n_j)$), 则对于任意 N' 个可靠散射中心的选取和关联可以通过设置各次回波中 N' 个距离数据点的不同排列

组合方式来实现。这里采用一索引表 $\mathbf{g}=[i_1, i_2, \dots, i_{N'}]$ 来描述 N' 个数据的一种排列组合方式, 其中 i_k ($k=1, 2, \dots, N'$) 表示 \mathbf{g} 中第 k 个位置所取某次回波中距离数据点的序号。因此, 按照排列组合方式 \mathbf{g} 构造出 N' 个数据点的投影距离向量可表示为

$$\boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g}) = [\rho_{i_{1j}}, \rho_{i_{2j}}, \dots, \rho_{i_{N'j}}]^T \quad (9)$$

由此, 设前 l 次回波中所采用的排列组合方式分别为 \mathbf{G}_j ($j=1, 2, \dots, l$), 则集合 $\mathbf{G}^l = \{\mathbf{G}_j\}_{j=1, 2, \dots, l}$ 可视为此 l 次回波中 N' 个散射中心的一种关联方案。同时, 根据式(1)可构建方案 \mathbf{G}^l 对应的投影距离矩阵,

$$\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{G}^l) = [\boldsymbol{\rho}_1(\mathbf{G}_1), \boldsymbol{\rho}_2(\mathbf{G}_2), \dots, \boldsymbol{\rho}_l(\mathbf{G}_l)] \quad (10)$$

基于第 2 节的重建模型, 可引入式(5)的几何约束, 在仿射重建域 $(\mathbf{S}_A, \mathbf{C}_A)$ 对关联方案的有效性进行判断: 一方面, 给定 l 次回波中 N' 个散射中心的一种关联方案 \mathbf{G}^l , 则当 $l \geq 3$ 时, 可通过对 $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{G}^l)$ 的 SVD 得到目标的一组仿射坐标 $\mathbf{S}_A = \mathbf{V}_r$; 另一方面, 在已知 \mathbf{S}_A 的情况下, 若给定第 j 次回波 ($j > l$) 上 N' 个散射中心的一种排列组合方式 \mathbf{g} , 则根据式(5)可对此回波时刻的仿射视角 \mathbf{c}_{A_j} 进行如下的最小二乘估计,

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{A_j} &= (\mathbf{S}_A^T \mathbf{S}_A)^{-1} \mathbf{S}_A^T \boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g}) = (\mathbf{V}_r^T \mathbf{V}_r)^{-1} \mathbf{V}_r^T \boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g}) \\ &= \mathbf{V}_r^T \boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g}) \end{aligned} \quad (11)$$

将仿射坐标 \mathbf{S}_A 在以上估计出的仿射视角 \mathbf{c}_{A_j} 上进行反投影, 可得到如下的反投影距离向量,

$$\tilde{\boldsymbol{\rho}}_j(\mathbf{g}) = \mathbf{S}_A \mathbf{c}_{A_j} = \mathbf{V}_r \mathbf{V}_r^T \boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g}) \quad (12)$$

这里将 $\boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g})$ 与 $\tilde{\boldsymbol{\rho}}_j(\mathbf{g})$ 的平均欧式距离定义为关联方案 \mathbf{G}^l 和 \mathbf{g} 下的反投影误差 $e_j(\mathbf{G}^l, \mathbf{g})$, 其有以下形式,

$$\begin{aligned} e_j(\mathbf{G}^l, \mathbf{g}) &= \frac{1}{N'} \|\boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g}) - \tilde{\boldsymbol{\rho}}_j(\mathbf{g})\| \\ &= \frac{1}{N'} \sqrt{\boldsymbol{\rho}_j^T(\mathbf{g}) (\mathbf{I} - \mathbf{V}_r \mathbf{V}_r^T) \boldsymbol{\rho}_j(\mathbf{g})} \end{aligned} \quad (13)$$

在正确的关联方案 \mathbf{G}^l 和 \mathbf{g} 下, 以上得到的反投影误差应具有较小值。基于这一事实, 可通过对反投影误差的检验实现对关联方案 \mathbf{G}^l 和 \mathbf{g} 有效性的判断。

基于上述原理, 本文提出一种基于递归决策的关联方法, 此方法包括的主要步骤如下:

- (1) 随机选取第 1 次回波中 N' 个数据点的一种基准组合方式 $\mathbf{G}_1 = [i_1, i_2, \dots, i_{N'}]$;
- (2) 从第 2 次回波开始对各次回波进行逐一添加。对于新添加的第 l 次回波, 由之前 $l-1$ 次回波的关联方案 \mathbf{G}^{l-1} 构建矩阵 $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{G}^{l-1})$, 并求解 \mathbf{S}_A ;
- (3) 对第 l 次回波中 N' 个数据点的 $P_{n_l}^{N'} = n_l! / (n_l - N')!$ 种排列组合方式进行逐一遍历。当遍历到某一种排列组合方式 \mathbf{g} 时, 计算其反投影误差 $e_l(\mathbf{G}^{l-1}, \mathbf{g})$;
- (4) 设置一阈值 T_e , 并判断: 若 $e_l(\mathbf{G}^{l-1}, \mathbf{g}) > T_e$,

则遍历此回波中的下一种排列组合方式；若 $e_l(\mathbf{G}^{l-1}, \mathbf{g}) \leq T_c$ ，则将 \mathbf{g} 作为此次回波的一种有效排列组合方式，并记录 $\mathbf{G}_l = \mathbf{g}$ ，然后转入下一次回波，即令 $l = l + 1$ ，并递归调用步骤(2)–步骤(4)，当完成调用后返回此次回波中的下一种排列组合方式进行遍历；

(5)以上递归判决过程中，当 $l > L$ 时，即意味着成功找到一种 N' 个散射中心的有效关联方案 \mathbf{G}^L ，则此时递归终止并输出 \mathbf{G}^L ；当递归返回到初始回波($l=2$)且所有排列组合方式已遍历结束，即意味着采用基准组合方式 \mathbf{G}_1 无法找到符合要求的关

联方案，此时重新返回步骤(1)。

由于对 \mathbf{S}_A 的求解至少需要3个视角，因此在上述步骤(4)中，当 $l \leq 3$ 时，将每一种遍历到的排列组合方式均视为有效排列组合，并进行后续步骤。由于算法需要遍历的排列组合方式较多，因此实际中可引入其他辅助约束条件对各种排列组合的可能性进行判断，例如利用散射中心徙动距离范围以及强度信息等，由此可进一步降低算法的运算量。

综上所述，本节提出的基于几何约束的部分可靠散射中心关联算法的流程如图3所示。

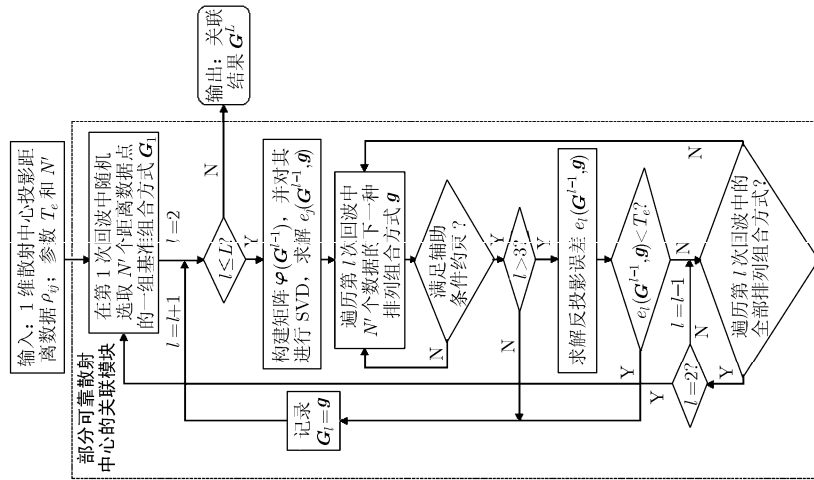


图3 部分可靠散射中心的关联算法流程图

3.2 非合作目标散射中心关联和 3 维重建系统

本节对本文提出的非合作目标散射中心关联和 3 维重建系统进行构建。

此系统中，首先采用 3.1 节提出的关联算法实现对目标上 N' 个可靠 1 维散射中心的自动选取和有效关联。利用由此 N' 个散射中心距离数据构建出的投影距离矩阵 $\varphi(\mathbf{G}^L)$ 对目标未知的运动参数 \mathbf{C} 进行估计。由第 2 节可知，运动参数 \mathbf{C} 的重建分为仿射重建 \mathbf{C}_A (式(7))与欧式重建 \mathbf{C}_E (式(8))两个层次，由于两者均满足式(5)的投影几何约束条件，这里可简单地采用仿射运动参数 \mathbf{C}_A 作为目标的重构路径参数。

基于以上重构出的运动参数 \mathbf{C}_A ，对于目标上剩余散射中心的关联实质上转化为目标已知姿态下的关联问题，其可以采用现有方法实现^[5]。之后，整合所有已关联距离数据可以对目标重新进行欧式重建。其中，由于 1 维散射中心中存在缺失的距离数据，这里可采用文献[15]提出的基于不完整距离数据的重建方法对其进行优化重建。

图4给出了上述系统的全部流程，其主要由部分可靠散射中心的关联、基于重构运动参数的关联

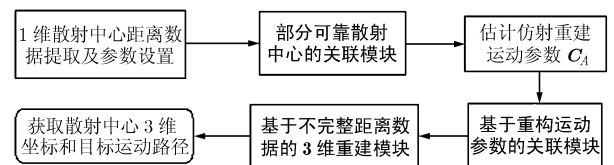


图4 非合作目标散射中心关联和3维重建系统流程图

以及基于不完整距离数据的 3 维重建三大模块组成。其中，本文 3.1 节提出的关联算法作为系统的首要模块，其对于后续的关联和重建工作具有重要意义。

4 仿真实验

本节通过仿真实验对本文提出的非合作目标散射中心的关联和重建系统进行了检验。实验设置了描述战机轮廓的 24 个 3 维点来模拟实际中雷达目标的 3 维散射中心，其 3 维坐标如图 5(a)所示。同时，实验对目标高机动的 3 维运动进行了仿真，其纯旋转运动路径如图 5(b)所示，其中两个旋转角度 (θ, α) 均在 10° 左右。

模拟实际中雷达对高机动目标的多视角连续观测，实验中对目标如图 5(b)所示的运动路径上均匀

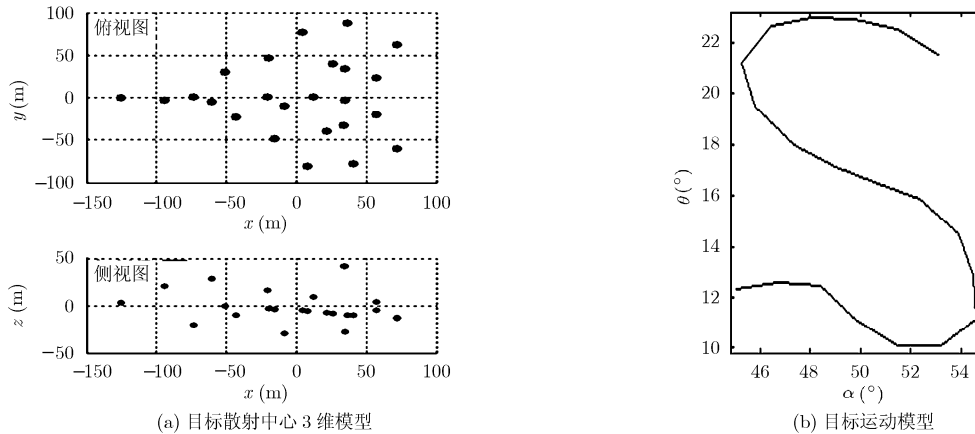


图 5 目标 3 维散射中心和运动模型

分布的 20 个视角下的雷达回波进行了仿真。仿真中设置了目标上 24 个散射中心具有随机的散射强度，并设置雷达信号为线性调频波(LFM)，其中心频率为 2.5 GHz，信号带宽为 600 MHz，信号的采样频率为 900 MHz(1.5 倍带宽)，由此得到目标在 20 个姿态处的回波序列。模拟实际中的噪声环境，实验中在各次回波中加入了一定信噪比的高斯白噪声。经过对回波的距离压缩，并采用包络对齐方法^[7]后可得到雷达 1 维距离像序列，其如图 6 所示。实验中，采用 MUSIC 方法^[9]对各姿态下的 1 维散射中心进行了提取，提取出的 1 维散射中心的距离位置如图 7 中的黑点所示。由图 7 可以看出，相对于真实的 1 维散射中心，实际提取出的 1 维散射中心距离位置存在着一定的误差，并且存在一些虚假点、缺失点、重叠点以及误差较大的数据点。

实验按照本文提出的非合作目标散射中心关联和重建系统的算法流程(如图 4 所示)，首先采用 3.1 节的关联方法对其中部分可靠散射中心进行了关联实验。实验中，设置可靠散射中心的数目为 $N' = 6$ ，并设置阈值为 $T_e = 0.1$ m。为降低运算量，实验将相邻回波间散射中心距离变动范围在 5 m 之内作为算法中的辅助约束条件，从而剔除大部分无效的排列组合方式。本实验在 Matlab 平台上进行，计算机配置为 1.6 GHz 的 CPU 主频，1 G 内存，以上关联操作运行时间约为 8.23 s。实验最终得到了 6 个可靠散射中心的关联结果，其如图 8 中实线所示。

采用以上关联出的 6 个散射中心的距离数据，可按照第 2 节的方法得到目标 20 次回波期间的仿射运动参数 C_A 。实验根据图 4 所示的系统流程中的第 2 模块，采用文献[5]中的方法对预先提取的全部 1 维散射中心进行关联，最终得到了 22 个散射中心的关联结果，其关联情况如图 8 中虚线所示。结合图 7 和图 8 可以看出，其中有两个散射中心由于存在

较多的缺失点或重叠点而未能关联出。另外，个别 1 维散射中心重叠处存在一些误关联情况，但由于关联过程满足了几何约束，因此其造成后续的重建误差可以控制在有限范围内。

根据图 4 所示的系统流程中的第 3 模块，实验采用文献[15]中的方法对以上关联出的 22 个散射中心以及目标运动路径进行了 3 维重建。由于欧式重建后的散射中心坐标和目标运动路径与真实值之间相差任意的角度旋转，实验中对重建结果进行了旋转校正。图 9 和图 10 分别给出了目标真实散射中心 3 维模型以及目标运动视角与重建结果的比较，由图中可以看出，目标散射中心以及运动视角的重建结果基本上保持了目标的轮廓特征和运动特征，但两者在尺度上均存在一定的误差，其主要原因在于重建中对仿射变换矩阵 M 的估计存在误差，由此导致最终的欧式重建结果存在一定的仿射扰动^[4]。实际中需要提高散射中心距离数据的提取精度，并且增加可靠距离数据点以及目标运动轨迹的丰富性，以进一步提高重建结果的准确性。

5 结束语

本文构建了一种非合作目标散射中心的关联和重建系统，系统中采用了一种基于几何约束的散射中心关联算法，有效地解决了目标未知运动下散射中心关联鲁棒性差的问题。由于本文主要着眼于利用几何方法实现散射中心的关联与重建，因此仅采用了散射中心的距离信息完成了对其空间 3 维信息的重构，在实验中也仅采用了散射中心的距离变动范围这一基础的辅助约束条件。实际中，散射中心的强度、类型等信息也可用来作为散射中心关联的重要辅助手段，以提高关联的准确性和效率。同时，重建后的 3 维散射中心的强度信息，可以取其各次回波中对应 1 维散射中心强度的平均值。

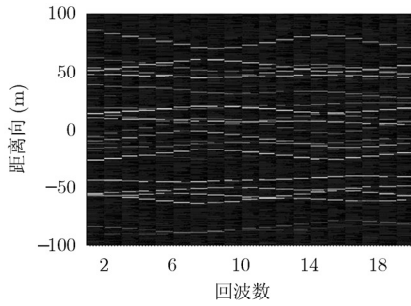


图6 雷达距离像仿真

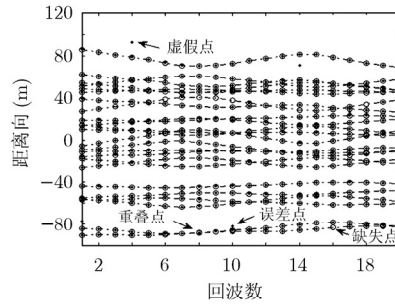


图7 提取出的 1 维散射中心

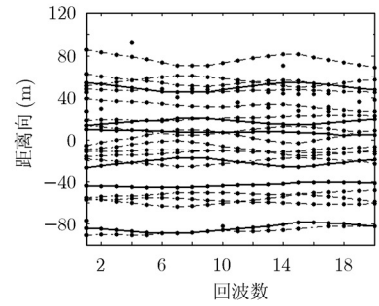
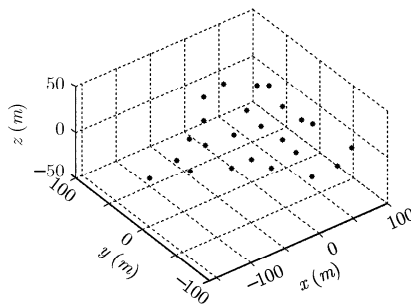
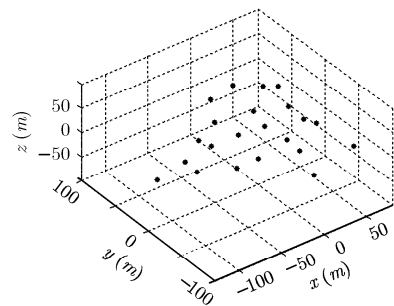


图8 1 维散射中心的关联结果



(a) 真实目标散射中心 3 维模型



(b) 目标散射中心 3 维重建结果

图9 目标真实散射中心 3 维模型与重建结果的比较

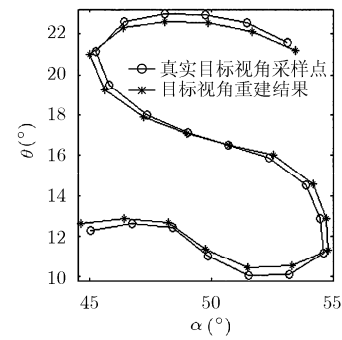


图10 目标真实运动视角与重建结果的比较

参考文献

[1] Gudnason J, Jingjing C, and Brookes M. HRR automatic target recognition from superresolution scattering center features [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(4): 1512-1524.

[2] Zhou J X, Zhao H Z, Shi Z G, et al. Global scattering center model extraction of radar targets based on wideband measurements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 56(7): 2051-2060.

[3] 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.

[4] 任双桥, 刘永祥, 黎湘, 等. 基于多姿态角下一维距离像的雷达目标三维成像[J]. *电子学报*, 2005, 33(6): 1088-1090.

Ren S Q, Liu Y X, Li X, et al. Radar target 3-D imaging based on multi-aspect range profiles [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(6): 1088-1090.

[5] 刘永祥, 吕玉增, 黎湘, 等. 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.

Liu Y X, Lü Y Z, Li X, et al. Scattering centers association and imaging based on multi-aspect measurement [J]. *Signal Processing*, 2008, 24(2): 168-171.

[6] Duque S, López-Dekker P, and Mallorqui J J. Single-pass bistatic SAR interferometry using fixed-receiver

configurations: theory and experimental validation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2740-2749.

[7] Qun Z and Tat S Y. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1818-1828.

[8] Frey O, Magnard C, Ruegg M, et al. Focusing of airborne synthetic aperture radar data from highly nonlinear flight tracks [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(6): 1844-1858.

[9] Chen V C and Ling H. Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis [M]. Boston: Artech House, 2002: 123-135.

[10] Ertin E, Moses R L, and Potter L C. Interferometric methods for three-dimensional target reconstruction with multipass circular SAR [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(3): 464-473.

[11] Zhang L, Xing M D, Qiu C W, et al. Two-dimensional spectrum matched filter banks for high-speed spinning-target three-Dimensional ISAR imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(3): 368-372.

[12] Stuff M, Sanchez P, and Biancala M. Extraction of three-Dimensional motion and geometric invariants [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2003, 14(1):

- 161-181.
- [13] Ferrara M, Arnold G, and 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.
- [14] 张颖康, 肖扬, 马晓涛. 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 [J]. *信号处理*, 2010, 26(9): 1371-1378.
- Zhang Y K, Xiao Y, and Ma X T. Motion path fitting and 3-D optimal reconstruction method of radar target based on geometry invariance of rigid object [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(9): 1371-1378.
- [15] Zhang Y K, Xiao Y, and Hu S H. 3D motion and geometric information system of single-antenna radar based on incomplete 1D range data [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(3): 412-420.
- [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]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2008: 64-66.
- Zhou J X. Theory and technology on reconstructing 3D scattering centers of radar targets in optical region [D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2008: 64-66.
- [17] Zhu D Y, Wang L, Yu Y S, *et al.* Robust ISAR range alignment via minimizing the entropy of the average range profile [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 204-208.
- [18] Kim K T and Kim H T. One-dimensional scattering centre extraction for efficient radar target classification [J]. *IEEE Proceedings of Radar, Sonar and Navigation*, 1999, 146(3): 147-158.
- [19] Krim H, Forster P, and Proakis J G. Operator approach to performance analysis of Root-MUSIC and Root-Min-Norm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1992, 40(7): 1687-1696.
- [20] 吴福朝. 计算机视觉中的数学方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 130-146.
- Wu F C. *Mathematical Methods in Computer Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2008: 130-146.
- [21] 孙真真. 基于光学区雷达目标二维像的目标散射特征提取的理论及方法研究 [D]. [博士学位论文], 国防科技大学, 2001: 16-45.
- Sun Z Z. Theory and method study based on the electromagnetic scattering features extraction of radar target 2-D image in optical region [D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2001: 16-45.
- 张颖康: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为雷达 3 维成像技术和计算机视觉.
- 肖 扬: 男, 1955 年生, 博士, 教授, 研究方向为空时信号处理和多维信号处理.
- 胡绍海: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 研究方向为信号处理及相关应用.