

文章编号: 2095-4980(2016)04-0531-04

## 基于 ISAR 像序列的目标三维重构

毕严先, 王 俊

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 提出了一种把矩阵分解应用于雷达目标的逆合成孔径雷达成像(ISAR)三维重构的方法。通过对目标运动场景建模, 将目标的ISAR成像过程化, 推导出图像序列中散射点二维位置坐标与原目标三维坐标的投影矩阵关系, 利用正交投影下的矩阵分解基本方法, 从观测矩阵中分解出原目标散射点的三维位置矩阵, 进而实现目标的三维位置重构, 仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 逆合成孔径雷达成像; 正交分解; 三维重构

**中图分类号:** TN957.52<sup>+2</sup>

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201604.0531

### 3-D target reconstruction based on ISAR sequence

BI Yanxian, WANG Jun

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** A matrix decomposition method is presented, which is applied to 3-D reconstruction of Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) target. By the modeling of target motion in the scene, the ISAR imaging process of the target is given. The projection matrix of the relationship between two-dimensional position coordinates of scattering point in image sequence and the three-dimensional coordinates for original target is derived. By using the basic method of matrix decomposition based on orthogonal projection, the decomposition of 3-D position matrix for primary target scattering points from the observation matrix is realized, and then the 3-D position reconstruction for target is completed. The simulation results validate its effectiveness.

**Key words:** Inverse Synthetic Aperture Radar; orthogonal decomposition; 3-D reconstruction

逆合成孔径雷达成像(ISAR)技术是雷达远程观测目标的常用手段之一, 目标运动引起目标相对于雷达的视角发生变化, 通过相关成像方法可以获得目标强散射中心三维位置信息在雷达视线上的投影, 从而获得目标散射点距离-多普勒图像。利用目标的二维 ISAR 像进行目标散射点位置的三维重构是近来研究热点<sup>[1-6]</sup>。文献[7]利用多个雷达站获得 ISAR 像序列, 估计出目标散射点三维位置以及运动参数。文献[8]基于刚体目标的几何不变性约束, 利用目标不同观测角度下的二维 ISAR 图像序列, 实现了对目标散射点的三维成像。卡内基·梅隆大学计算机系的 Tomasi 和 Kanade 提出了从光学图像序列中恢复刚体目标三维形状和运动的因式分解法<sup>[9]</sup>。文献[10]在文献[9]的基础上进行了改进, 将 Tomasi 和 Kanade 提出的因式分解法引入 SAR 图像处理领域, 实现了单天线 SAR 运动舰载目标三维形状重构。从数学角度看, ISAR 成像过程基本满足正交投影关系, 这一点与光学图像的产生过程类似。该方法通过在目标本体坐标系下, 建立三维目标体与其二维成像面的正交投影关系, 利用矩阵因式分解的方法, 恢复出目标的三维形状和相对运动信息。

受上述矩阵分解法和 ISAR 正交投影成像基本原理的启发, 本文尝试将二者结合, 利用观测目标小角度运动条件下得到的 ISAR 像序列, 采用正交投影下的矩阵分解基本方法, 实现目标散射点三维位置重构, 仿真结果表明了该方法的有效性。

#### 1 基于正交投影的矩阵分解法

假定利用正交投影成像的方法, 得到了某一目标的一系列二维图像。采样得到其中的  $F$  帧, 跟踪到  $P$  个特征点, 将各个特征点坐标, 放入一个矩阵  $W$  中:

$$W = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{F1} & \cdots & x_{FP} \\ y_{11} & \cdots & y_{1P} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{F1} & \cdots & y_{FP} \end{bmatrix} W \quad (1)$$

矩阵称为观测矩阵，其每列包含了某一个散射点在每帧上的坐标，每行包含了所有散射点在某一帧中的横、纵坐标。假定在绝对坐标系下，原始目标的空间坐标为： $S_p = [x_p, y_p, z_p]^T$ ,  $p = 1, 2, \dots, P$ ，从目标参考坐标系来看，获取的目标二维图像序列是由一组单位正交向量  $i_f, j_f$  决定的， $i_f$  相当于图像平面中的  $x$  轴， $j_f$  相当于图像平面中的  $y$  轴。帧对应的一组单位向量可组成映射矩阵：

$$M = \begin{bmatrix} i_1^T \\ \vdots \\ i_f^T \\ j_1^T \\ \vdots \\ j_f^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

将经过配准后的各个特征点原始三维空间坐标，写成坐标矩阵  $S \in R^{3 \times P}$ ：

$$S = [S_1 \ S_2 \ \cdots \ S_p], \quad \sum_{p=1}^P S_p = 0 \quad (3)$$

依据上述表示法，可以得到下面的正交投影公式：

$$W = MS \quad (4)$$

因为  $2F \times P$  维的观测矩阵  $W$  是由  $2F \times 3$  维的映射矩阵  $M$  和  $3 \times P$  维坐标矩阵  $S$  相乘得来，所以理论上， $W$  矩阵的秩最多为 3。

基于秩理论，可利用子空间计算方法从观测矩阵  $W$  中恢复出坐标矩阵  $S$ ，过程如下：

将测量矩阵  $W$  进行奇异值分解，分成 1 个对角矩阵  $A$  和 2 个秩最多为 3 的正交矩阵  $U, V$ 。假定不失一般性，有  $2F \geq P$ ，有：

$$W = UAV^T \quad (5)$$

实际中， $W$  矩阵的秩并不一定精确为 3，但几乎等于 3。这里考虑最佳估计，可取  $A = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ ，且  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 > 0$ ， $U$  为  $2F \times 3$ ， $V$  为  $P \times 3$ 。在对  $S$  的估计时可以设定：

$$\hat{M} = U\sqrt{A}, \quad \hat{S} = \sqrt{A}V^T \quad (6)$$

## 2 ISAR 像序列的三维重构原理

从 ISAR 像序列中提取  $F$  帧观察，经散射点关联后，可得到目标的位置坐标  $\{P_k | k = 1, 2, \dots, N\}$ 。再经过定标处理，可得到观测矩阵

$$W = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{F1} & \cdots & r_{FN} \\ d_{11} & \cdots & d_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{F1} & \cdots & d_{FN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由前述的 ISAR 成像投影变换关系可知，配准后的目标散射点的位置，只由每帧 ISAR 像对应的转动向量  $w_f$  和雷达视线向量  $\rho_f$  决定。因此，一系列的  $\{(\rho_f, w_f), f = 1, 2, \dots, F\}$  决定了 ISAR 图像序列中散射点的位置。

记  $\mathbf{h}_f = -\boldsymbol{\rho}_f^T$ ;  $\mathbf{v}_f = -(\mathbf{w}_f \times \boldsymbol{\rho}_f)^T$ , 二者分别反映了径向距离和横向多普勒的变换作用, 因此 ISAR 成像投影矩阵方程, 即式(4)可写成:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{h}_f \\ \mathbf{v}_f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{fk} \\ d_{fk} \end{pmatrix} \quad (8)$$

将  $N$  个散射点、 $F$  帧图像经过组合, 得到投影矩阵和目标原始坐标矩阵, 分别记为:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_F \\ v_1 \\ \vdots \\ v_F \end{pmatrix} \quad \mathbf{S} = \begin{pmatrix} x_1 & \cdots & x_N \\ y_1 & \cdots & y_N \\ z_1 & \cdots & z_N \end{pmatrix} \quad (9)$$

通过这种形式的组织后, 便可将所有散射点和序列帧写进投影方程  $\mathbf{W} = \mathbf{MS}$  中, 这里  $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{2F \times 3}$ ,  $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{3 \times N}$ ,  $\mathbf{W} \in \mathbf{R}^{2F \times N}$ 。

利用上一节中介绍的矩阵分解法, 可从观测矩阵  $\mathbf{W}$  中计算出目标散射点的原始位置坐标矩阵  $\mathbf{S}$  的估计矩阵:

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{C}^{-1} \hat{\mathbf{S}} = \mathbf{C}^{-1} \sqrt{\Delta \mathbf{V}}^T \quad (10)$$

### 3 实验结果及分析

为了验证算法的有效性, 采用 5 个散射中心的模拟目标进行了仿真, 其三维视图及散射中心分布如图 1 所示。目标高度和最大半径分别为  $l=2$  m,  $r_{\max}=0.5$  m。其中顶点和 4 个基底的散射强度分别设为: 3,1。设模拟目标绕自身中轴, 以  $2\pi$  rad/s 的角速度顺时针进行自转。

仿真中假定已经对目标进行了平动补偿和定标处理, 信号采用步进频率, 频率间隔  $\Delta f$  为 15 MHz, 频率点数取 100 个, 频率起始点为: 9 GHz; 信号采样间隔  $\Delta T$ (脉冲重复周期)为: 0.001 s, 总仿真时间为 0.5 s。

信号的设置  $R_{SN}=15$  dB, 经过 200 次蒙特卡洛实验, 重构散射点与真实散射点的位置分布结果如图 2(a)所示。

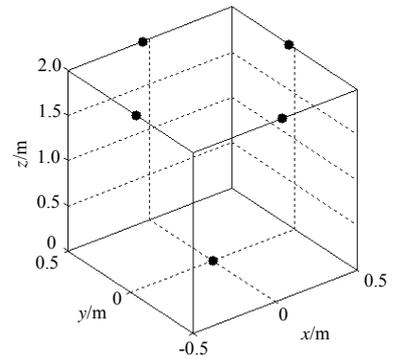


Fig.1 3-D image of the simulated target  
图 1 含 5 个散射中心的模拟目标三维视图

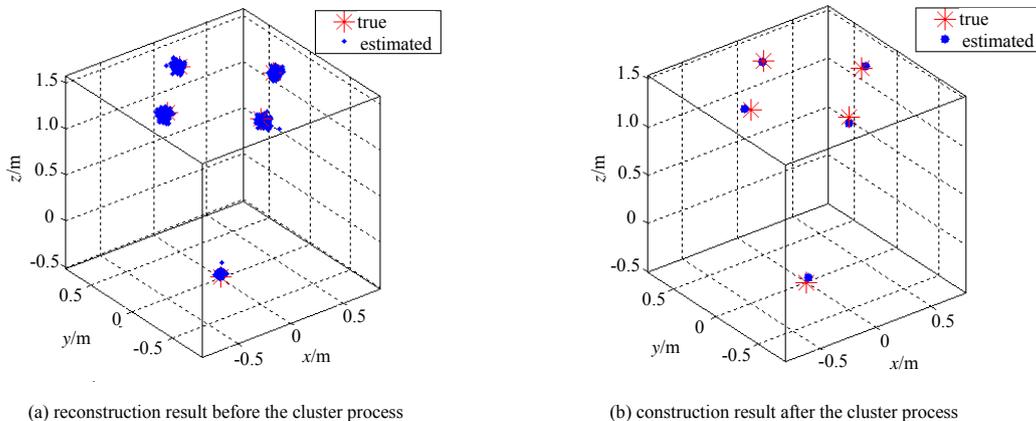


Fig.2 Simulated 3-D reconstruction results based on the ISAR sequence  
图 2 基于 ISAR 像序列的三维重构仿真结果

将图 2(a)所得所有可能的重构散射点进行聚类处理后, 得到了重构散射点的中心位置的最佳估计, 仿真结构

如图 2(b)所示。由仿真结果可见,聚类后的重构散射点分布与真实散射点三维位置十分接近,说明该算法具有可行性。基于 ISAR 像序列的三维重构,未利用目标的运动信息,其目标的三维位置重构坐标完全是以获取的 ISAR 像作为数据源推导而来,因此 ISAR 像的采样帧数、测量经历的视角范围和目标 ISAR 成像质量(信噪比),都将对目标的三维重构性能产生影响。

#### 4 结论

本文从数学的角度将目标的 ISAR 成像过程公式化,从 ISAR 投影成像方程的角度出发,利用正交投影下的矩阵因式分解方法,从观测矩阵中分解出原目标的三维坐标的估计矩阵,利用 Procrustes Distance 函数对此估计坐标矩阵进行校正,实现了目标的三维重构。但本文的实验基于散射中心不多、小转角转动的条件,而随着散射中心数目增多、转动角度较大,散射中心将发生遮挡、滑动等情况,如何对目标进行三维重建还有待研究。

#### 参考文献:

- [ 1 ] ZHOU J,SHI Z,FU Q. Three-dimensional scattering center extraction based on wide aperture data at a single elevation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015,53:1638-1655.
- [ 2 ] 张仲明. 基于高分辨一维距离像的雷达目标识别方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2004. (ZHANG Zhongming. The method of radar target recognition based on the HRRP[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2004.)
- [ 3 ] 秦敬喜. 基于散射中心模型的高分辨率雷达目标识别方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008. (QIN Jingxi. High resolution radar target recognition method research based on the scattering center model[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2008.)
- [ 4 ] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [ 5 ] 禹正杨. 三维重建及三维可视化技术在外科领域应用的初步探索[D]. 杭州:浙江大学, 2005. (YU Zhengyang. Three-dimensional reconstruction and visualization techniques in surgery applications preliminary study[D]. Hangzhou,China: Zhejiang University, 2005.)
- [ 6 ] 韩春艳. 基于气象雷达基数据的三维重构[D]. 天津:天津大学, 2012. (HAN Chunyan. 3-D reconstruction based on meteorological data[D]. Tianjin:University of Tianjin, 2012.)
- [ 7 ] SUWA K,WAKAYAMA T,IWAMOTO M. Three-dimensional target geometry and target motion estimation method using multistatic ISAR movies and its performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011,49(6): 2361-2373.
- [ 8 ] MCFADDEN F E. Three-dimensional reconstruction from ISAR sequences[C]// Radar Sensor Technology and Data Visualization. Orlando,FL:SPIE, 2002:58-67.
- [ 9 ] TOMASI C,KANADE T. Shape and motion from image streams:a factorization method[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 1992,90(21):9795-9802.
- [10] 汤立波,李道京,吴一戎. 单天线 SAR 运动舰船目标三维形状重构[J]. 遥感学报, 2007,11(4):468-472. (TANG Libo,LI Daojing,WU Yirong. Moving ship target 3-D reconstruction with the single antenna SAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2007,11(4):468-472.)

#### 作者简介:



毕严先(1988-),男,安徽省桐城市人,在读博士研究生,主要研究方向为雷达三维成像技术、阵列信号处理和现代雷达信号处理。email:byxpaper@126.com.

王 俊(1972-),男,陕西省渭南市人,教授,主要研究方向为雷达信号实时处理。