

文章编号: 1007-4619(2007)04-0468-05

# 单天线 SAR 运动舰船目标三维形状重构

汤立波<sup>1,2</sup>, 李道京<sup>1</sup>, 吴一戎<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 电子学研究所, 微波成像技术国家重点实验室, 北京 100080

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 基于单天线高分辨率机载 SAR 研究了运动舰船目标三维形状重构问题。对运动舰船目标回波信号利用 KEYSTONE 变换和高阶相位拟合法完成距离徙动校正后, 利用时频分析方法产生运动舰船目标二维图像序列, 尝试着将因子分解法引入到 SAR 运动目标图像处理领域, 通过因子分解法对二维图像序列进行处理, 实现运动目标三维形状重构, 最后给出了真实 SAR 数据的运动舰船目标三维重构结果, 实验结果表明了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 运动舰船目标; 因子分解法; 三维重构

**中图分类号:** TP752.1      **文献标识码:** A

## Moving Ship Target 3D Reconstruction with the Single Antenna SAR

TANG Libo<sup>2</sup>, LIDaojing<sup>1</sup>, WUYi rong<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The single antenna SAR moving ship targets 3D reconstruction is investigated based on high resolution airborne SAR. The range migration correction is completed by KEYSTONE transform and phase polynomial compensation. Time frequency analysis imaging method can give a sequence of 2D ship images. Then, we introduce the factorization method to SAR image processing field. From these 2D images sequences, the 3D shape of ship targets can be reconstructed by factorization method. The imaging results of real SAR data show the effectiveness of this method.

**Key words:** SAR; moving ship targets; factorization method; 3D reconstruction

### 1 引言

在海浪的作用下, 海面运动舰船目标存在复杂的运动形式, 除了平动以外, 还存在横摇、纵摇和偏航运动。这虽然给高分辨率 SAR 运动舰船目标的二维成像造成很大困难, 但它的这种复杂运动形式, 却为其三维形状重构创造了条件<sup>[1,2]</sup>。

在图像处理领域, 利用二维图像序列实现目标的三维形状重构是一个重要的研究方向。通常情况下, 单天线 SAR 主要用于获取二维图像, 但是, 如果

能够获得目标的三维图像, 将更有助于目标识别, 加强视觉效果。本文尝试着将 Tomasi 和 Kanade 提出的因子分解法引入到 SAR 图像处理领域, 该方法利用连续的二维图像序列实现目标的三维形状重构, 能够获得稳定、准确的三维重构结果。因子分解法在光学图像处理领域已经得到广泛应用, 同时, 在这种方法的基础上, 很多改进的算法也相继提出, 它的适应范围越来越广<sup>[1-3]</sup>。

本文介绍了因子分解法的基本原理及其实现步骤。对运动舰船目标回波信号利用 KEYSTONE 变换和高阶相位拟合法完成距离徙动校正后, 利用时

收稿日期: 2006-01-16 修订日期: 2007-01-10

作者简介: 汤立波 (1975—), 男, 中国科学院研究生院博士生, 主要研究方向为合成孔径雷达运动目标检测与成像。E-mail: libo\_tang@

频分析方法, 获得连续的 SAR 运动舰船目标二维图像序列, 进而通过因子分解法对 SAR 二维图像序列进行处理, 实现运动舰船目标的三维形状重构, 最后给出了真实 SAR 数据的运动舰船目标三维重构结果, 实验结果表明了该方法的有效性。

## 2 运动舰船目标二维成像

文献 [4] 中介绍了一种运动舰船目标成像方法, 该方法利用 KEYSICONE 变换完成回波信号的距离徙动校正, 利用高阶相位拟合法完成距离弯曲校正。利用该方法完成运动舰船目标距离徙动校正后, 舰船目标信号中除了剩余的旋转运动影响外, 大部分散射点的距离单元跨越问题已经得到解决。而这些剩余的旋转影响为舰船目标的三维重构创造了条件<sup>[1-3]</sup>。

为了实现运动舰船目标三维重构, 首先需要获得按时间顺序排序的二维 SAR 图像序列, 本文利用时频分析方法实现舰船目标二维成像。该方法的好处主要有两点: 首先, 时频分析方法可以在方位时间的任意时刻获得一副 SAR 图像; 另外, 利用时频分析方法可以有效缓解图像散焦问题。时频分析方法的成像效果, 在很大程度上取决于时频分布函数的性能, 一个理想的时频分布, 不仅应在时频域具有高的分辨率, 而且应准确地反映信号的瞬时频率。常用的时频分布有短时傅里叶变换 (SIFT), Pseudo Wigner Vill (PWV) 分布等。为了抑制交叉项影响, 本文采用 SIFT 方法解决运动舰船目标的成像问题, 通过时频分析方法可以获得按时间顺序排列的运动舰船目标二维图像序列, 此时, 图像处于距离多普勒域, 为了在三维重构过程中保持坐标一致性, 需要将“多普勒频率”转换为“方位距离”, 转换公式为:

$$y = -\frac{v_r}{v} R = -\frac{f \times \lambda}{2 v_r} R \quad (1)$$

式中,  $v$  为载机速度,  $f$  为多普勒频率,  $\lambda$  为波长,  $R$  为散射点的斜距。

## 3 因子分解法在 SAR 中的应用

本文将因子分解法应用到 SAR 图像处理领域, 尝试着利用因子分解法解决单天线 SAR 运动目标的三维重构问题。因子分解法在 SAR 图像处理领域的应用应具备一定的条件, 通过比较可以看到: 原始的因子分解法是基于图像与图像获取设备的正投影关系建立的, 而 SAR 是基于后向散射成像的; 因

子分解法要求相机相对于目标作平面运动, 而 SAR 是装在飞机上作直线飞行的, 这些都具有相似性。而且利用时频分析, 我们有可能获得时间连续的二维图形序列, 这为因子分解法在 SAR 中的应用创造了条件<sup>[1-4]</sup>。

这里, 简单介绍一下因子分解法<sup>[2,3]</sup>。设 SAR 图像序列中共有  $F$  帧海面运动舰船目标二维图像, 在舰船目标上选取  $P$  个参考点, 由这  $P$  个参考点在所有  $F$  帧图像中的位置坐标, 构成因子分解法的输入测量矩阵  $W$ ; 坐标  $(x_p, y_p)$  代表第  $P$  个参考点在第  $F$  帧图像中的位置, 其中  $x$  是 SAR 距离向坐标,  $y$  是 SAR 方位向坐标, 输入测量矩阵  $W$  是一个  $2F \times P$  矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_P \\ \vdots & & \vdots \\ x_F & \cdots & x_P \\ y_1 & \cdots & y_P \\ \vdots & & \vdots \\ y_F & \cdots & y_P \end{bmatrix} \quad (2)$$

矩阵  $W$  的每一列包含一个参考点在所有 SAR 二维图像中的坐标, 每一行包含所有参考点在一帧 SAR 二维图像中的  $x$  坐标或者  $y$  坐标<sup>[2,3]</sup>。

本文中, 利用在 SAR 二维图像中进行区域网格划分的手段, 实现 SAR 二维图像序列散射点坐标信息提取。在 SAR 二维图像序列中, 将图像划分为  $n$  个网格, 目标质心所在的网格位置设为中心网格, 在中心网格内选取幅度最强的散射点为坐标原点。在每个网格区域, 利用图像幅度值, 选取  $m$  个散射点作为特征点, 将这  $m$  个特征点相对于原点的坐标提取出来, 则可获得  $n \times m = P$  个特征点的坐标信息, 将这些特征点坐标信息按固定的顺序排列, 写入测量矩阵  $W$ 。

根据文献 [2] 和 [3] 介绍的秩定律以及特征点坐标矢量与图像的投影关系, 测量矩阵  $W$  能够分解为矩阵  $M$  和  $S$  的乘积, 即  $W = MS$  其中, 矩阵  $M \in \mathbb{R}^{2F \times 3}$  为

$$M = [ \begin{matrix} \vec{i}_1 & \cdots & \vec{i}_k & \vec{j}_1 & \cdots & \vec{j}_l \end{matrix} ]^T \quad (3)$$

式中, 矢量  $\vec{i}$  和  $\vec{j}$  为第  $F$  帧时刻, 图像获取设备相对于第  $F$  帧图像的方向矢量,  $\vec{i}$  对应图像平面的  $x$  轴,  $\vec{j}$  对应  $y$  轴, 矩阵  $M$  体现了图像获取设备的运动变化。另外, 矩阵  $S \in \mathbb{R}^{3 \times P}$  为

$$S = [ \begin{matrix} \vec{s}_1 & \cdots & \vec{s}_P \end{matrix} ] \quad (4)$$

式中,  $\vec{s}_p$  为第  $P$  个参考点的三维空间坐标  $(x_p, y_p, z_p)$ ,  $\sum_{p=1}^P \vec{s}_p = 0$  矩阵  $S$  代表散射点相对于质心的位

置坐标,反映了目标三维形状<sup>[2 3]</sup>。

在因子分解法的具体实现过程中,可以利用奇异值分解将输入测量矩阵  $W$  分解为两个秩为 3 的矩阵。奇异值分解后,可以获得正交阵  $U \in R^{3 \times 3}$  和  $V \in R^{3 \times 3}$ , 这样有

$$W = U \Sigma V^T \quad (5)$$

这里,  $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ , 并且  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 > 0$ 。实际上, 矩阵  $W$  的秩不一定正好等于 3 而是近似为 3。  $U$  由矩阵  $W$  的左侧奇异阵的前 3 列组成,  $\Sigma$  包含前 3 个奇异值,  $V$  由矩阵  $W$  的右侧奇异阵前 3 列组成, 设

$$M = U \text{ 和 } S = \Sigma V^T \quad (6)$$

可将  $W$  分解为

$$W = MS \quad (7)$$

秩定律表明, 每个子矩阵的维数至少为 3<sup>[2 3]</sup>。

由于式 (7) 的矩阵分解结果不是惟一的, 只有符合约束条件的才是它的真实解。通过求解一个  $3 \times 3$  的非奇异矩阵  $A$  利用这个矩阵可以将矩阵  $M$  和  $S$  变换为  $M$  和  $S$  的真实解。

$$\begin{aligned} M &= MA \\ S &= A^{-1} S \end{aligned} \quad (8)$$

因为矩阵  $M$  的行矢量  $\hat{i}$  和  $\hat{j}$  应满足正交约束条件<sup>[2 3]</sup>

$$\hat{i}^T \hat{i} = \hat{j}^T \hat{j} = 1, \quad \hat{i}^T \hat{j} = 0 \quad (9)$$

从而有

$$\hat{i}^T L \hat{i} = 1, \quad \hat{j}^T L \hat{j} = 1, \quad \hat{i}^T L \hat{j} = 0 \quad (10)$$

这里,  $L \in R^{3 \times 3}$  为对称矩阵

$$L = AA^T \quad (11)$$

矢量  $\hat{i}$  和  $\hat{j}$  是矩阵  $M$  的行矢量。通过设定  $\hat{i} =$

$$[\hat{i}_1, \hat{i}_2, \hat{i}_3], \quad \hat{j} = [\hat{j}_1, \hat{j}_2, \hat{j}_3] \text{ 和 } L = \begin{bmatrix} \hat{l}_{11} & \hat{l}_{12} & \hat{l}_{13} \\ \hat{l}_{21} & \hat{l}_{22} & \hat{l}_{23} \\ \hat{l}_{31} & \hat{l}_{32} & \hat{l}_{33} \end{bmatrix},$$

式 (10) 可以重写为

$$GI = c \quad (12)$$

这里,  $G \in R^{3 \times 6}$ ,  $I \in R^6$ ,  $c \in R^3$  分别定义为<sup>[3]</sup>

$$G = \begin{bmatrix} g^T(\hat{i}_1, \hat{i}_1) \\ \vdots \\ g^T(\hat{i}_1, \hat{i}_2) \\ g^T(\hat{i}_1, \hat{i}_3) \\ \vdots \\ g^T(\hat{i}_2, \hat{i}_1) \\ g^T(\hat{i}_2, \hat{i}_2) \\ \vdots \\ g^T(\hat{i}_3, \hat{i}_1) \\ g^T(\hat{i}_3, \hat{i}_2) \\ \vdots \\ g^T(\hat{i}_3, \hat{i}_3) \end{bmatrix}, \quad I = \begin{bmatrix} \hat{l}_{11} \\ \vdots \\ \hat{l}_{33} \end{bmatrix}, \quad c = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$g^T(a_i, b_j) = [a_{i1} b_{j1} a_{i2} b_{j2} + a_{i2} b_{j1} a_{i1} b_{j3} + a_{i3} b_{j1} a_{i2} b_{j2} a_{i2} b_{j3} + a_{i3} b_{j2} a_{i3} b_{j3}] \quad (14)$$

从而, 矢量  $I$  有解为

$$I = (G^T G)^{-1} G^T c \quad (15)$$

进而, 由矢量  $I$  确定  $A$  并得到  $M$ 。这样, 矩阵  $M$  和  $S$  可以通过式 (8) 计算得到。矩阵  $A$  将矩阵  $M$  变换为运动矩阵  $M$ 。同样, 矩阵  $A^{-1}$  将  $S$  变换为形状矩阵  $S$ 。这样, 利用二维图像序列, 通过因子分解法实现了目标散射点的三维重构<sup>[2 3]</sup>。

另外, 值得注意的是, 因子分解法三维重构的精度与多种因素有关, 例如: 参与重构的二维图像数量、目标在图像帧间隔时间内的运动角度大小、特征点坐标的提取精度等因素有关。因此, 很多情况下, 精度分析是在事后利用目标的真实形状和重构结果进行对比实现的。在 SAR 中, 因为运动目标的运动情况是未知的, 而且通常 SAR 中的运动目标是非合作目标, 无法知道目标的真实形状, 所以对其进行精度分析比较困难<sup>[1-4]</sup>。

## 4 数据内插

通过因子分解方法获取了舰船目标上  $P$  个参考点的三维空间坐标矩阵  $S$  利用这些参考点的三维坐标, 可以获得舰船目标的三维形状。但因为舰船目标上的参考点比较稀疏, 为了使目标三维图像能够比较平滑, 采用内插的方法增加三维图像采样点密度。

内插方法有很多种, 主要有分块内插、剖分内插和单点移面内插等方法。为了满足快速处理要求, 保证精度, 本文采用分块二次多项式内插方法<sup>[9]</sup>。

内插模型为:

$$H_{\text{interpolate}} = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 \quad (16)$$

式中,  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  是与周围采样点高程相关的多项式系数, 它可以依据已有的样本点利用最小二乘法计算得到;  $x, y$  为已知采样点的平面位置。

## 5 真实数据处理结果

本文处理的舰船目标真实数据来自一 X 波段高分辨率机载 SAR 系统, 该 SAR 系统工作于正侧视, 脉冲重复频率 PRF=1500 Hz, 方位向处理脉冲数为 8192, 数据对应的方位向持续时间约为 5.5 s。

对运动舰船目标 (船长约 80 m, 斜距 11 km) 进行距离徙动校正和二维成像。图 1 是舰船目标分别在

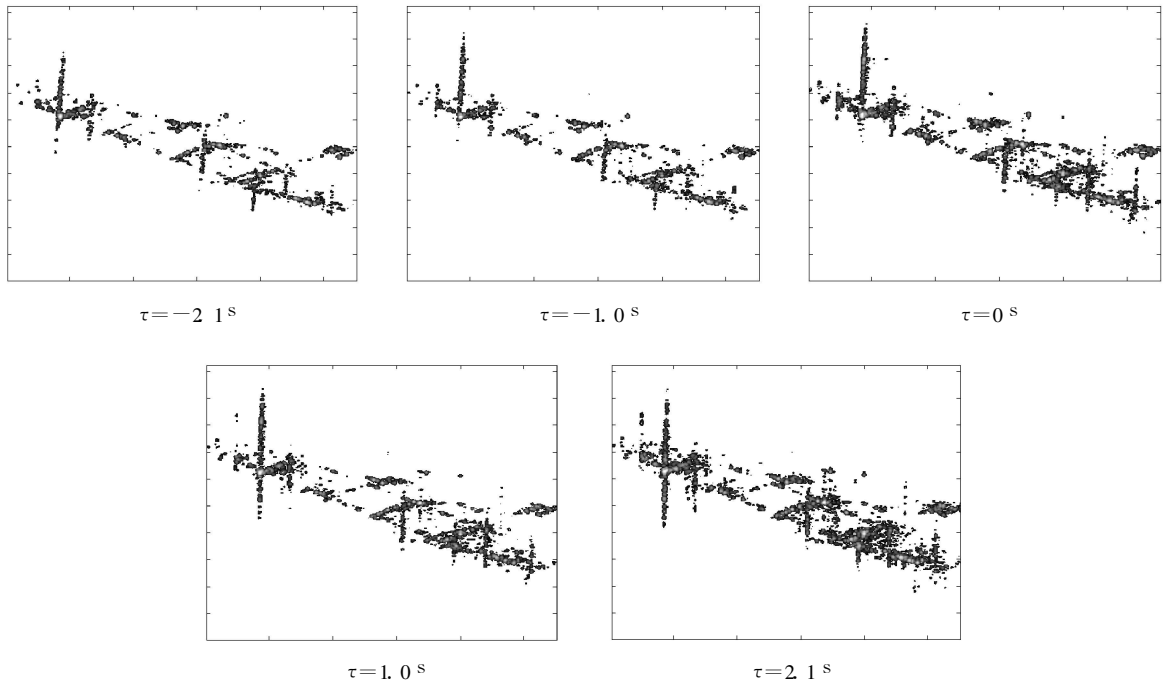


图 1 利用 SIFT 方法在不同时刻对舰船运动目标成像结果

Fig 1 The ship images obtained by SIFT at different azimuth time

$\tau = -2.1^s, \tau = -1.0^s, \tau = 0^s, \tau = 1.0^s, \tau = 2.1^s$  时刻利用短时傅里叶变换 (SIFT) 方法获得的二维图像序列。

图 1 所示的运动舰船二维图像轮廓清晰, 大部分散射点都已经聚焦, 只有少数散射点仍然存在散焦现象, 这主要是由于这些散射点高度较高并且存在三维运动造成的。这些散焦的散射点的多普勒频率大致以甲板线为中心, 上下或左右偏移。在这 5 幅 SAR 二维图像中选取参考点 (参考点应尽可能多的选取), 然后, 提取各个参考点的坐标位置, 利用所有参考点的坐标参量组成输入测量矩阵  $W$  进而应用因子分解法进行处理。

图 2 给出了利用因子分解法进行舰船目标三维重构后获得的采样点投影图, 中间有许多漏点尚需进行内插处理 (为了显示方便, 将三维图像数据的高度值转换成灰度值, 图中越黑表示高度越低, 越白表示高度越高, 舰船两侧为海洋区域)。图 3 显示了内插处理后得到的投影图。

图 4 为运动舰船目标的三维重构结果。在舰船目标三维图像中, 存在几个高程较高的位置, 这些位置对应于二维图像序列中散焦的那些散射点, 这些高程较高的位置在舰船晃动时存在较大的运动线速度, 这也是在二维图像中这些高程较高散射点散焦的主要原因。



图 2 利用三维重构获得的原始采样点投影图

Fig 2 The projection figure of original sample point

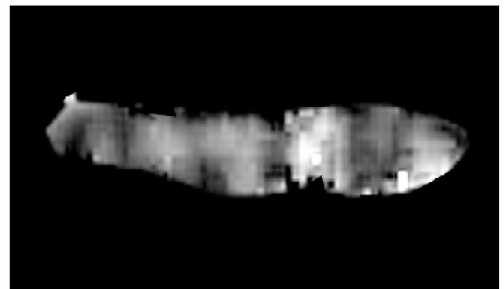


图 3 内插处理后得到的投影图

Fig 3 The projection figure after interpolation

另外值得注意的是, 在三维图像中, 由于高程较高的散射点在距离方向的运动线速度大于舰船目标上的其他散射点, 从而造成这些高程较高的散射点在方位向上存在一定程度的位移现象。

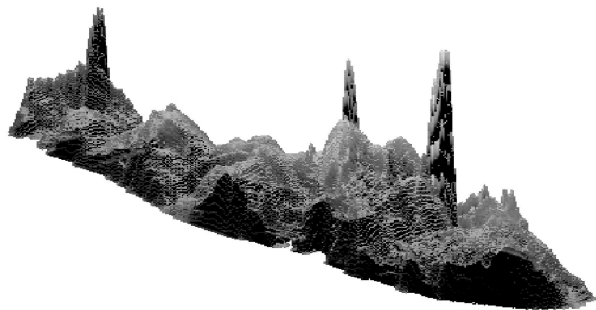


图 4 舰船目标的三维图像

Fig. 4 The 3D image of ship

## 6 结 论

海面舰船目标的旋转运动为其三维形状重构创造了条件, 本文对单天线 SAR 运动舰船目标三维重构进行了尝试, 实验结果表明了该方法的有效性。

值得指出的是, 与光学图像相比, SAR 图像的灰度稳定度不够, 散射点回波强度起伏较大, 这给参考点的选取和参考点坐标的准确提取带来一定困

难, 如果能够获得更高精度的参考点坐标, 可能会获得更好的三维重构结果; 另外, 在进行内插处理时, 由于采用的是二次多项式内插方法, 有时会在舰船边缘引入插值干扰。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Frank E McFadden. Three Dimensional Reconstruction from ISAR Sequences [ A ]. Proc SPIE C. Vol 4744. 58—67.
- [ 2 ] Tomasi C, Kanade T. Shape and Motion from Image Streams Under Orthography: A Factorization Method [ J ]. Computer Vision, 1992, 9(2): 137—154.
- [ 3 ] Toshiko Morija, Takeo Kanade. A Sequential Factorization Method for Recovering Shape and Motion From Image Streams [ J ]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(8): 858—867.
- [ 4 ] Tang L B, Li D J, Hong W, et al. High Resolution SAR Imaging of Moving Ships [ A ]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [ C ]. 2005.
- [ 5 ] You H J. Fast Processing Technology of Airborne 3D Remote Sensing Data and Man-made Building Extraction from 3D Data [ D ]. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2001. [ 尤红建. 基于激光的三维遥感数据处理及建筑物提取 [ D ]. 中国科学院遥感应用研究所, 2001 ]