

DOI:10.11918/202112110

基于本质矩阵变换的多角度 SAR 三维重建方法

李高鹏^{1,2}, 徐乾坤^{1,2}, 薛伶玲³, 张云^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院电子工程技术研究所, 哈尔滨 150006;

2. 对海监测与信息处理工业和信息化部重点实验室, 哈尔滨 150006; 3. 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要: 合成孔径雷达(SAR)通过多角度观测可获取目标的三维立体信息。目前,多角度 SAR 三维重建多针对正侧视运动轨迹开展研究,通过构建投影几何关系式,利用目标在不同 SAR 图之间的偏移量与投影几何的关系求解目标三维信息。此类方法缺少对投影关系的数学建模过程,并且在 SAR 运动轨迹包含斜视角和俯仰角的情况下,求解误差较大。基于直线 SAR 轨迹下的投影几何关系,建立多角度 SAR 投影数学模型。在该数学投影模型中,SAR 成像平面像素点坐标与目标三维空间坐标的关系矩阵称为本质矩阵。多角度 SAR 数学模型将三维重建问题转化为矩阵逆运算问题。将本质矩阵建立的投影表达式变换为齐次线性方程组,采用奇异值分解算法求解目标三维坐标。通过星载 SAR 轨迹参数进行实验仿真,验证了所提投影模型与三维重建算法的有效性。

关键词: 多角度 SAR; 基础矩阵; 本质矩阵; 奇异值分解; 三维重建; 投影几何模型; 斜视角

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)03-0037-09

Multi-view SAR 3D reconstruction method based on essential matrix transformation

LI Gaopeng^{1,2}, XU Qiankun^{1,2}, XUE Lingling³, ZHANG Yun^{1,2}

(1. Research Institute of Electronic Engineering Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Monitoring and Information Processing, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150006, China; 3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: SAR can obtain 3D information of the target through multi-view observation. At present, multi-view SAR 3D reconstruction mainly assumes a side-looking trajectory. By constructing projective geometry equations, this type of method calculates the target offset between SAR images and derives the target height from the projective geometry. However, this type of method lacks a mathematical modeling process for the projection relationships and exhibits significant solving errors when the SAR trajectory includes squint and pitch angles. This paper analyzed the linear SAR trajectory, summarized the geometric relationship of the projection, and obtained the mathematical model of multi-view SAR projection. In the mathematical projection model, the relation matrix between pixel coordinates in the SAR imaging plane and target 3D space coordinates is called the essential matrix. The multi-view SAR mathematical model transforms the 3D reconstruction problem into a matrix inverse operation problem. The projection expression established by the essential matrix is transformed into homogeneous linear equations, and the singular value decomposition algorithm is used to solve the 3D coordinates of the target. Spaceborne SAR trajectory parameters were used for experimental simulation to verify the effectiveness of the proposed projection model and 3D reconstruction algorithm.

Keywords: multi-view SAR; basic matrix; essential matrix; singular value decomposition; 3D reconstruction; projective geometry model; squint angle

随着 SAR 技术的持续发展,多观测维度与多维信息获取成为研究热点^[1],其中三维信息获取技术备受关注。多角度 SAR 三维成像技术是近年来发展的一种三维重建模式,可在单次航过中对目标区

域进行多角度成像,获得 SAR 图像序列,实现目标区域的快速三维重建^[2]。该技术通过对目标进行不同角度(方位维或高度维)观测,利用不同角度下成像的差异性实现目标三维重构。针对多角度

收稿日期: 2021-12-23; 录用日期: 2022-05-05; 网络首发日期: 2023-12-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231214.0953.005>

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2020-037); 国家自然科学基金面上基金(62371170)

作者简介: 李高鹏(1976—),男,教授,硕士生导师; 徐乾坤(1999—),男,硕士研究生; 薛伶玲(1976—),女,研究员

通信作者: 张云, zhangyunhit@hit.edu.cn

SAR 三维重建算法,空天院、国防科学技术大学等机构已开展相关研究,包括联合多方位角调频率估计的星载 SAR 三维成像算法和基于低秩与稀疏矩阵分解的三维重建算法等。

目前常见的多角度 SAR 三维成像模式包含曲线 SAR、圆迹 SAR 和聚束式 SAR 等。曲线 SAR 成像模式下,载体在方位向与高度向上均产生位移,因此具备方位向与高度向虚拟孔径合成条件,具有三维重建能力。K. Knaell^[3]论证了曲线 SAR 三维重建的可行性,提出基于 CLEAR 技术的增量多参数算法(incremental multi-parameter, IMP),并通过机载实验获得了点目标三维重建结果;由于 IMP 算法计算量大,苏志刚等^[4]提出了基于松弛思想的顺序优化算法,将回波表示为三维复正弦信号之和,忽略距离参数与垂直距离参数的耦合,分别估计目标距离和高度,从而减少算法计算量;随后苏志刚等^[5]又提出了降维搜索算法,通过非迭代方法获得散射点的初值,进一步降低了迭代次数;何峰等^[6]基于压缩感知原理,采用基追踪方法实现目标三维特征的全局最优求解。上述研究表明,曲线 SAR 需要在高度上具备大合成孔径,而星载 SAR 轨迹的高度向合成孔径有限,因此使用曲线 SAR 方法进行三维重建时高程分辨力较低。

圆迹 SAR 通过雷达对目标进行 360°圆周观测,实现目标全方位三维成像。H. Oriot 等^[7]进行机载圆迹 SAR 实验,根据不同高度目标在 SAR 图像中偏移量差异计算目标高度,实现了对尼姆竞技场三维重建;微波成像全国重点实验室^[8]在四川进行了机载实验并实现了三维成像;S. Palm^[9]构建三维网格,将网格点投影到 SAR 图像中,计算投影点的相关系数和,保留最大相关系数对应的网格点,但未给出斜视 SAR 轨迹下的投影关系,无法实现该场景的三维重建;张金强等^[10]提出基于低秩矩阵和稀疏矩阵分解的三维重建方法,低秩矩阵为高度相同的目标像素点集合,稀疏矩阵为其余目标像素点集合,通过在不同高度分解得到相应的低秩矩阵,实现 SAR 图像中所有像素点的高度估计,随后在 Gotcha 数据集上验证了方法的有效性,但是该方法需要满足高度相同的目标在多角度 SAR 图像序列中位置偏移量相同的条件,因此更适用于圆迹 SAR 成像模式。圆迹 SAR 中每一段子孔径近似为正侧视轨迹,对于 SAR 运动轨迹包含斜视角和俯仰角时,上述算法无法实现三维成像。

SAR 工作在聚束模式下,能持续获取目标不同观测角的信息。Sergi Duque 等^[11]分析了 TerraSAR-X 在聚束 SAR 模式下,多普勒调频率与下视角和目

标高度的关系;李真芳等^[12]将卫星轨迹等效为三维曲线阵列,采用距离-多普勒模型,推导出斜视情况下的多普勒调频率误差与目标高度的线性关系。由于多普勒调频率误差导致目标在方位向出现偏移,可采用图像配准方法估计方位向偏移距离,进而计算多普勒调频率误差;杨彦辉等^[13]推导了星载不同观测角度下图像偏移与目标高度的关系式;该关系式在正侧视情况下成立,对于斜视情况,存在较大的误差。

基于 SAR 多图像序列的三维重建主要利用图像偏移信息,根据目标点在不同 SAR 图像中的偏移计算出目标高度,该方法需要考虑大观测角时的图像配准相关系数较低的问题。张金强^[14]针对大观测角差的图像间相关系数低,配准难度大且精度低的问题,提出利用小观测角图像序列配准的偏移量估计大观测角差值时的偏移量,构建偏移量与目标高度的方程,采用最小二乘法得到目标高度的联合估计解。

现有多角度 SAR 三维重建算法大多是分析正侧视 SAR 情况下三维重建问题,并且直接采用投影几何关系计算目标高度。基于上述问题,结合星载 SAR 应用场景,本文进一步考虑了 SAR 运动轨迹包含俯仰角和斜视角时的几何投影关系,并据此建立数学模型。该模型反映了目标与 SAR 图像像素点的投影关系,投影关系以矩阵形式表示,称为本质矩阵。传统方法在求解目标三维信息时,需要结合投影场景解方程;本文在目标三维成像中,根据投影场景确定本质矩阵后,后续求解过程脱离投影场景,将目标三维坐标求解转化为纯粹的数学问题。与传统的多角度 SAR 目标三维成像方法相比,本文实现了端对端的求解过程,优化了计算过程。

本文结构安排如下:首先分析不同轨迹下的基础矩阵表达式,基础矩阵定义为在 SAR 相位中心投影点为原点,并且相位中心与目标连线的投影与 Y 轴重合时,目标与 SAR 图像中投影点之间的关系矩阵;其次,为实现同一点目标在不同观测角度下坐标一致,需将多角度 SAR 轨迹统一至相同坐标系,此时基础矩阵无法表示目标与投影点的关系,推导不同观测角度下目标点与 SAR 图像之间的投影矩阵关系,构建本质矩阵;最后给出基于本文模型的三维坐标求解算法;通过仿真实验验证本文数学模型与三维重建算法的有效性。

1 多角度 SAR 基础矩阵推导

建立 SAR 目标点投影的数学模型,推导在 SAR 相位中心与目标点连线的 XOY 平面的投影与 y 轴

重合时的投影矩阵,即构建基础矩阵。首先分析正侧视SAR轨迹的基础矩阵,随后分析二维及三维SAR运动轨迹的基础矩阵。目标三维坐标投影到SAR图像像素点的过程可表示为基础矩阵的线性变换,从而将三维重建问题转变为矩阵运算问题。

1.1 一维运动基础矩阵推导

当SAR沿方位向运动且为正侧视模式时,点目标几何投影模型如图1所示。其中SAR沿X轴运动,高度为H,下视角为 θ ;SAR成像图像坐标为 $O'(0,0)$,目标点 $P'(x',y')$ 投影到SAR图像点,SAR相位中心点坐标为 $T(x_T, y_T, z_T)$ 。

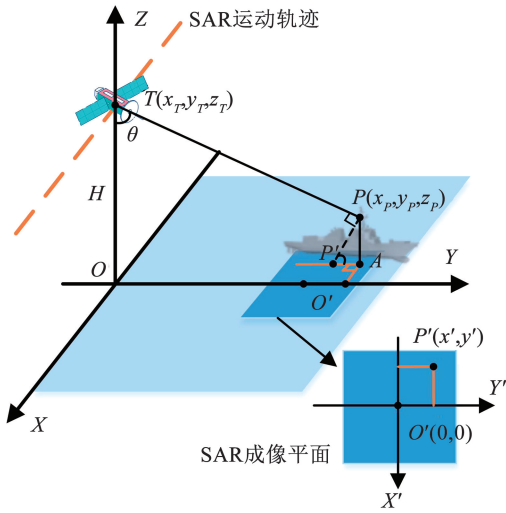


图1 SAR一维运动投影模型

Fig. 1 1D motion projection model of SAR

z'_0 表示成像平面参考高度,在正侧视情况下,目标投影点 P' 与目标点 P 的X轴坐标相同,即:

$$x'_p = x_p \quad (1)$$

投影点 P 的Y轴坐标与下视角 θ 和目标相对于成像平面的高度差有关,其中 $\angle TPP' \approx 90^\circ$, $\angle PP'A = \theta$,则 P' 在Y轴的坐标为

$$y'_p = y_p - \frac{(z_p - z'_0)}{\tan \theta} \quad (2)$$

由于公式(1)和(2)得到的是投影点在 XOY 坐标系中的坐标,需将其转换到SAR图像的像素点位置。设X轴方向上图像一个像素表示 ρ_x 米,Y轴方向上图像一个像素表示 ρ_y 米, ρ_x 和 ρ_y 表示图像的精度,则目标投影点在SAR图像坐标系中的位置为:

$$x' = \frac{(x_p - x'_0)}{\rho_x} \quad (3)$$

$$y' = \frac{(y'_p - y'_0)}{\rho_y} = \left[y_p - \frac{(z_p - z'_0)}{\tan \theta} - y'_0 \right] / \rho_y \quad (4)$$

将公式(3)和公式(4)整理为矩阵形式:

$$m = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1/\rho_x & 0 & 0 \\ 0 & 1/\rho_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x'_0 \\ 0 & 1 & -1/\tan \theta & \frac{z'_0}{\tan \theta} - y'_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$m = CHM \quad (6)$$

其中 H 为基础矩阵。

1.2 二维运动与三维运动基础矩阵推导

根据图1所示,SAR二维运动存在两种情况,SAR在 XOZ 平面运动和SAR在 XOY 平面运动。

首先讨论SAR在 XOZ 平面运动时的基础矩阵,几何投影模型如图2所示, φ 表示在 XOZ 平面中SAR轨迹与X轴夹角,目标在SAR图像中的投影点为 $P'(x',y')$,目标在 XOY 平面的垂直投影为A点,与 P' 沿X轴和Y轴的交点分别为C点和B点。

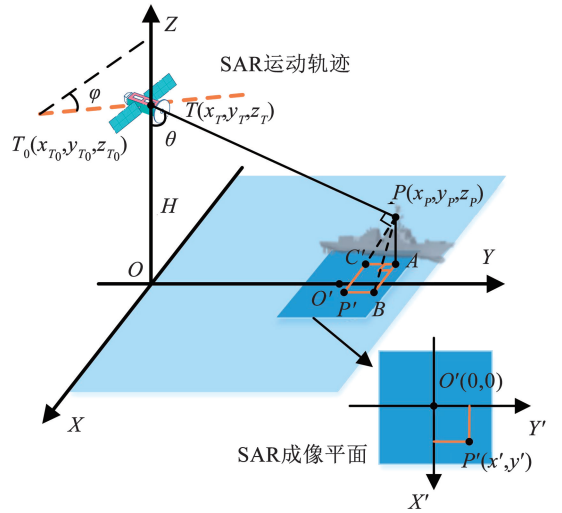


图2 SAR XOZ平面运动投影模型

Fig. 2 XOZ plane motion projection model of SAR

该SAR运动轨迹可以等效为X轴合成孔径和Z轴合成孔径。其中,X轴合成孔径影响目标点在Y轴投影,投影点为C,其Y轴坐标与 P' 点相同。其中 $\angle TPC \approx 90^\circ$, $\angle PCA = \theta$,则 P' 在Y轴坐标为

$$y'_p = y_p - \frac{(z_p - z'_0)}{\tan \theta} \quad (7)$$

Z轴方向合成孔径影响目标点在X轴方向投影,投影点为B,其X轴坐标与 P' 点相同。其中 PB 与载体轨迹垂直, $\angle BPA = \varphi$,将 φ 定义为航迹俯仰角,则 P' 在X轴坐标为:

$$x'_p = x_p + (z_p - z'_0) \tan \varphi \quad (8)$$

$$\tan \varphi = \frac{z_{T_0} - z_T}{x_{T_0} - x_T} \quad (9)$$

当 $\varphi = 0^\circ$ 时, 则退化为正侧视模式, 与分析一致。根据目标投影到 XOY 坐标系的点关系式, 可以得出基础矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \tan \varphi & -z'_0 \tan \varphi - x'_0 \\ 0 & 1 & -1/\tan \theta & \frac{z'_0}{\tan \theta} - y'_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

当 SAR 在 XOY 平面做二维运动时, 或在三维空间中运动时, 可以通过坐标等效投影, 将 XOY 平面内的运动轨迹映射到 XOZ 平面中, 因此将上述两种情况的基础矩阵一同推导。此时的几何投影模型如图 3 所示, 将 SAR 运动轨迹上的点 $T_0(x_{T_0}, y_{T_0}, z_{T_0})$ 投影到 XOZ 中的等效点 $T'_0(x_{T'_0}, y'_{T'_0})$, $\angle DT'_0T_0 = \theta$ 。目标点在 Y 轴投影点表达式不变, 目标点在 X 轴方向投影点表达式如公式(11)所示。等效点 T'_0 的坐标及等效航迹俯仰角 φ 公式(12)和(13)给出。

$$x'_p = x_p + (z_p - z'_0) \tan \varphi \quad (11)$$

$$z'_{T_0} = z_{T_0} + \frac{y_{T_0} - y_T}{|\tan \theta|} \quad (12)$$

$$\tan \varphi = \frac{z'_{T_0} - z_T}{x_{T_0} - x_T} = \left[(z_{T_0} - z_T) + \frac{y_{T_0} - y_T}{|\tan \theta|} \right] \frac{1}{x_{T_0} - x_T} \quad (13)$$

基础矩阵格式与公式(10)相同, 只是 $\tan \varphi$ 值不相同。上述基础矩阵计算过程中, 将 SAR 运动轨迹投影到 XOZ 只是计算基础矩阵, SAR 成像时仍然

采用实际的 SAR 运动轨迹。

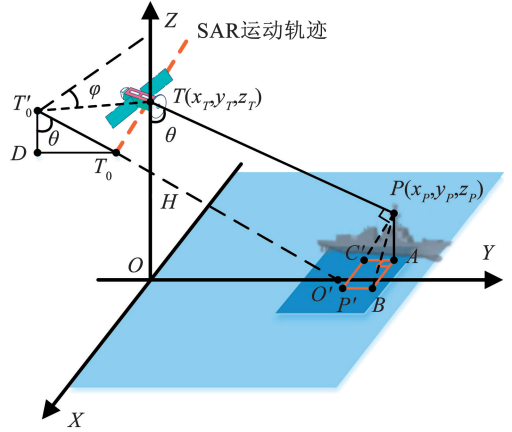


图 3 SAR 三维运动投影模型

Fig. 3 3D motion projection model of SAR

2 基于本质矩阵的多角度 SAR 成像处理

多角度 SAR 三维成像中, 不同角度观测下的 SAR 成像通常在独立坐标系中完成。为了使相同点目标在不同观测下坐标一致, 需统一坐标系。此时, SAR 轨迹和目标坐标关系通常都不满足基础矩阵求解条件, 因此引入本质矩阵表示该情况下的目标与投影关系。为利用上述推导的基础矩阵表示投影关系, 需要对成像坐标系进行变换, 使得变换后的坐标系满足基础矩阵求解条件, 基础矩阵 H 在坐标系变换后计算, 坐标变换结果如图 4 所示。

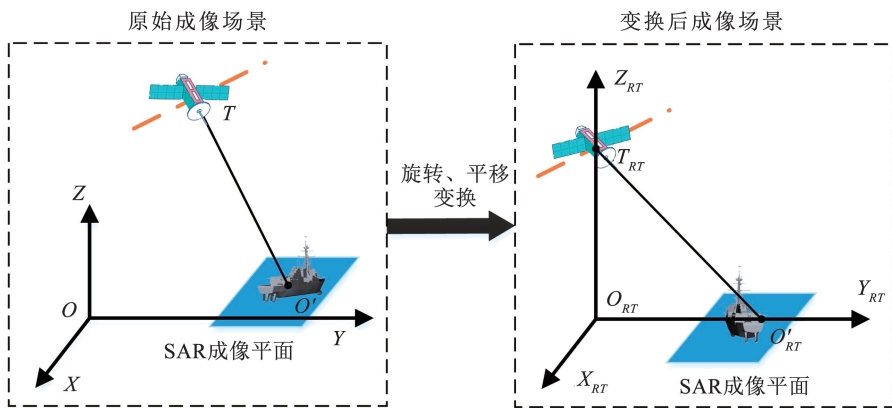


图 4 SAR 坐标系变换示意图

Fig. 4 SAR coordinate system transformation

原始成像场景到变换后成像场景的坐标系变换分为两步: 首先通过平移矩阵 $T \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 将原始坐标系原点 O 平移至新原点 O_{RT} ; 随后经过旋转变换矩阵 $R \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ 完成姿态旋转, 使得 T_{RT} 到成像平面中心 O'_{RT} 的连线 $T_{RT}O'_{RT}$ 投影为 Y 轴。因此, 最终的 SAR 图像坐标与原始目标坐标的关系为

$$m_{RT} = CHM_{RT} = C \times H \times R \times T \times M \quad (14)$$

式中, 基础矩阵 H 在旋转平移后的坐标系中计算, M_{RT} 为坐标系变换后的目标坐标, 与原始坐标 M 的关系为

$$M_{RT} = RTM \quad (15)$$

采用 BP 成像算法, 支持选择任意的 SAR 图像

坐标系。当SAR图像 $X'O'Y'$ 坐标系与原始 XOY 坐标系平行时,需引入旋转矩阵 r 并取姿态旋转矩阵的逆矩阵 R^{-1} 的前三行与前三列;当SAR图像 $X'O'Y'$ 坐标系与 $X_{RT}O_{RT}Y_{RT}$ 坐标系平行时,旋转矩阵 r 为单位矩阵,投影表达式为

$$m = CrHRT \times M = EM \quad (16)$$

因此本质矩阵为

$$E = CrHRT \quad (17)$$

3 坐标求解算法

根据SAR运动轨迹和SAR参数建立投影的数学模型并得出投影表达式后,将SAR成像转化为投影问题,目标三维坐标求解即为投影方程组的求解过程。根据SAR参数可以计算出本质矩阵,由公式(16)可以得出SAR图像像素点与目标点三维坐标的关系。由于目标三维坐标为待求解量,至少需要三个方程。通过图像配准得到不同SAR图像中的同名点的像素坐标,将其代入投影方程组即可求解目标坐标。本节采用两幅SAR图像中的同名点为例求解目标三维坐标,多幅SAR图像的求解过程不变。其中公式(18)表示第一幅图像的关系式,公式(19)表示第二幅图像关系式:

$$m_1 = E_1 M \quad (18)$$

$$m_2 = E_2 M \quad (19)$$

将公式(18)展开,可得:

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ y'_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{12} \\ E_{13} \end{bmatrix} M \Rightarrow \begin{cases} x'_1 = E_{11} M \\ y'_1 = E_{12} M \\ 1 = E_{13} M \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x'_1 E_{13} M = E_{11} M \\ y'_1 E_{13} M = E_{12} M \end{cases} \quad (20)$$

其中 E_{11}, E_{12}, E_{13} 对应于 E_1 的行向量,最后将公式(20)整理为

$$\begin{bmatrix} x'_1 E_{13} - E_{11} \\ y'_1 E_{13} - E_{12} \end{bmatrix} M = 0 \quad (21)$$

同理,对第二幅图像也可以得到

$$\begin{bmatrix} x'_2 E_{23} - E_{21} \\ y'_2 E_{23} - E_{22} \end{bmatrix} M = 0 \quad (22)$$

联合公式(21)和公式(22)可得

$$\begin{bmatrix} x'_1 E_{13} - E_{11} \\ y'_1 E_{13} - E_{12} \\ x'_2 E_{23} - E_{21} \\ y'_2 E_{23} - E_{22} \end{bmatrix} M = 0 \quad (23)$$

$$\text{令 } A = \begin{bmatrix} x'_1 E_{13} - E_{11} \\ y'_1 E_{13} - E_{12} \\ x'_2 E_{23} - E_{21} \\ y'_2 E_{23} - E_{22} \end{bmatrix}, \text{ 则公式(23)可以表示为}$$

$AM=0$,这是一个包含4个方程、3个未知数的超定齐次线性方程组,为求解该方程的最小二乘解,需采用奇异值分解(SVD)方法。首先对矩阵 A 每一行进行归一化处理,得到归一化后的矩阵 A_{norm} ,对 A_{norm} 进行奇异值分解:

$$A_{\text{norm}} = USV^T \quad (24)$$

由于公式(23)为齐次线性方程组,所以 V 的最后一列即为目标齐次坐标 M 的最小二乘解。

在多幅SAR图像三维重构中,能够得到多个如公式(21)所示的约束方程,将这些方程合并后仍可得齐次线性方程组 $AM=0$,随后采用奇异值分解即可求解目标坐标。在多角度SAR三维重建中,使用多幅SAR图像能够提高目标坐标估计的鲁棒性,并减少由于遮挡导致的目标无法估计现象。

本文提出的多角度SAR三维重建算法中,当目标散射特性表现为各向异性时,不同SAR图像中目标的幅度不相同,会导致配准困难,造成目标三维坐标估计错误;对于面目标,由于平面各部分目标散射特性相同且随角度变化规律一致,会导致副图像中多个像素点能够与主图像像素点配准,同样会引发目标三维坐标估计错误。

4 算法实现流程

本文算法基于本质矩阵变换实现三维成像,其核心思路是:首先依靠SAR运动参数和成像参数计算本质矩阵,随后通过图像配准得出同名点在不同SAR图像中的像素坐标,将其代入公式(23),最终采用奇异值分解算法计算目标三维坐标。实验整体流程如图5所示,处理步骤如下所示:

步骤1:将多角度SAR运动轨迹统一到相同坐标系下;

步骤2:选择第 n 个角度作为参考视角,将其轨迹的天线相位中心 XOY 平面的投影点平移到坐标原点,计算出平移矩阵;

步骤3:将天线相位中心与目标点连线的 XOY 平面的投影线段与 Y 轴重合,计算出旋转矩阵;

步骤4:结合SAR成像参数,根据公式(10)计算出基础矩阵,根据公式(17)计算出本质矩阵;

步骤5:将图像配准得到的同名点坐标与本质

矩阵带入公式(23),构建齐次线性方程组,采用奇异值分解计算目标点三维坐标。

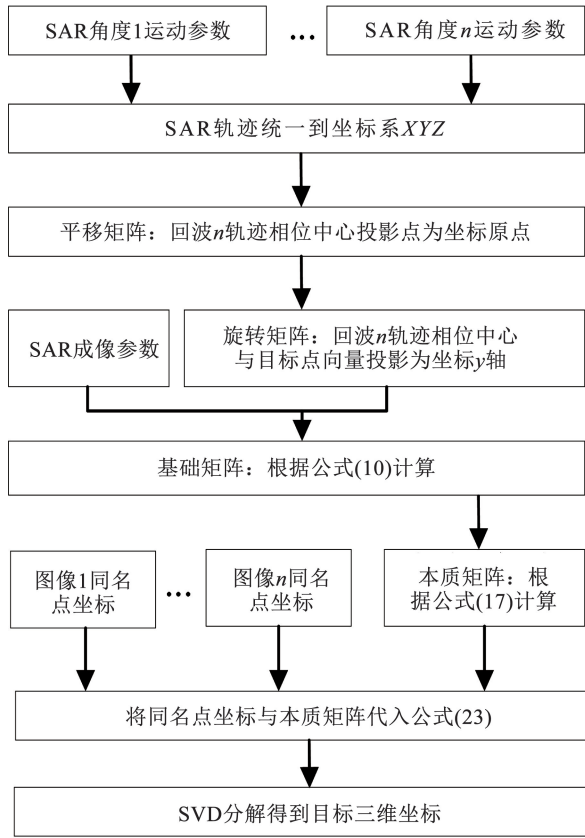


图 5 算法流程示意图

Fig. 5 Algorithm flowchart

5 仿真实验与分析

5.1 SAR 参数影响与三维重建误差分析

本文提出的多角度 SAR 三维重建数学模型的影响因素包含配准误差、下视角 θ 、航迹俯仰角 φ 和观测角差异,其中观测角差异分为下视角向观测角差异与方位向观测角差异,前者由载机高度不同导致,后者由载机方位不同导致。本节仿真分析上述参数对三维重建误差的影响。

在基础矩阵中包含下视角 θ ,对于不同的坐标点,其下视角不相同,为了简化计算,将成像中心点的下视角 θ 代替 SAR 图像成像区域所有目标的下视角,需验证该简化是否影响目标估计误差。仿真生成 3 600 个到 SAR 成像中心相同距离单元的目标点,仿真场景为星载 SAR 场景,目标与卫星的距离是 577.35 km,下视角 θ 为 30° ,航迹俯仰角 φ 取 0° ,方位向观测角差异为 10° ,其余仿真参数见表 1。在该仿真条件下,统计估计出的目标 x 、 y 和 z 轴坐标误差。结果如图 6 所示,可以看出,在 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的场景范围内,目标点在 x 、 y 、 z 轴上的坐标估计误差均小于 1 m,这一数值小于 SAR 分辨率,这表

明,在本文算法下,使用成像中心点的下视角 θ 代替成像区域内所有目标点的下视角,对目标坐标估计基本没有影响。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	参数值
方位向分辨率	1 m
距离向分辨率	1 m
SAR 图像像素尺寸	1 m
配准误差	0 m

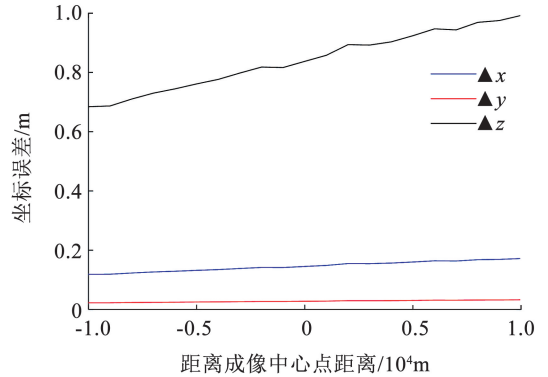


图 6 成像中心点距离与目标估计误差关系

Fig. 6 Relationship between imaging center distance and target estimation error

为分析配准误差对三维重建精度的影响,开展如下仿真实验:随机生成 3 600 个目标点,目标点分布在 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 的区域内,对目标点进行投影,计算出理想投影点位置。仿真参数:下视角 θ 为 30° 航迹俯仰角 φ 为 0° ,方位向观测角差异为 10° ,配准误差为 $0 \sim 5.5 \text{ m}$,其余仿真参数与表 1 相同。采用本文算法求解目标三维坐标,统计出 3 600 个点的坐标平均误差。

仿真结果如图 7 所示,目标点在 x 、 y 和 z 轴上的坐标估计误差与配准误差成线性正比关系。根据公式(10)可知,下视角 θ 和航迹俯仰角 φ 会影响基础矩阵,因此坐标误差与配准误差的斜率与 SAR 参数相关。

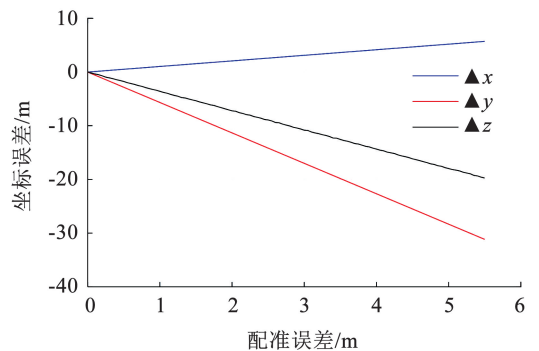


图 7 坐标求解误差与配准误差关系

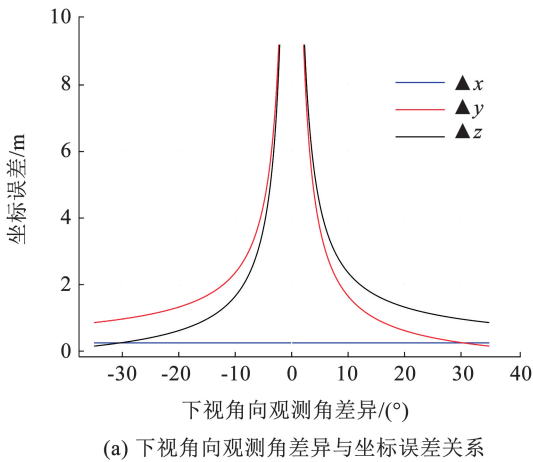
Fig. 7 Relationship between coordinate solving error and registration error

为探究在配准误差固定时,SAR航迹俯仰角 φ 对三维坐标估计精度的影响,开展如下仿真实验:随机生成3600个目标点,下视角 θ 为 45° ,航迹俯仰角 φ 为 $1^\circ \sim 30^\circ$,方位向观测角差异为 0° ;配准误差取0.5 m,其余仿真参数与表1相同,仿真随机生成3600个目标点,统计在相应参数下目标估计误差。

仿真结果如图8所示,目标 x 轴坐标估计误差几乎不随航迹俯仰角变化;目标 y 轴和 z 轴坐标估计误差随航迹俯仰角增大呈指数衰减趋势。

多角度SAR三维重建中观测角差异会影响目标三维坐标估计,该部分对下视角向观测角差异和方位向观测角差异两类观测角差异进行仿真分析,仿真时取航迹俯仰角 φ 为 0° 。

在下视角向观测角差异方针中,固定方位向观测角差异为 0° ,其中一部雷达下视角固定为 45° ,另一部雷达下视角 θ 在 $10^\circ \sim 80^\circ$ 范围内变化,对应下视角向观测角差异为 $-35^\circ \sim 35^\circ$ 。考虑到雷达视线方向分辨率不变,地距向分辨率与下视角 θ 有关,因



此地距向配准误差取 $0.5/\sin(\theta)$ m;方位向分辨率与合成孔径大小相关,与下视角无关,所以方位向配准误差取0.5 m,其余仿真参数与表1相同。

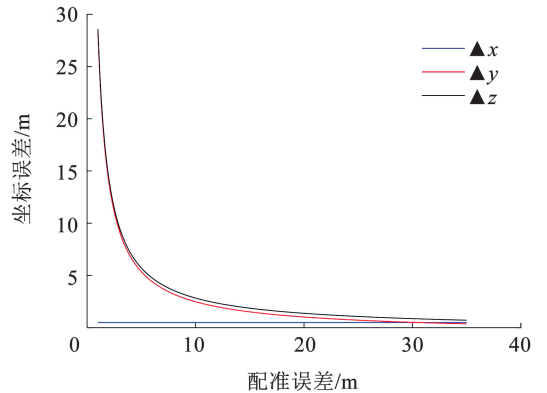


图8 SAR航迹俯仰角与目标估计误差关系

Fig. 8 Relationship between SAR pitch angle and target estimation error

在方位向观测角差异仿真中,固定下视角 θ 为 45° ,方位观测角度差为 $1^\circ \sim 30^\circ$,配准误差为图像分辨率的一半,即0.5 m,仿真中随机生成3600个目标点,其余仿真参数与表1相同。

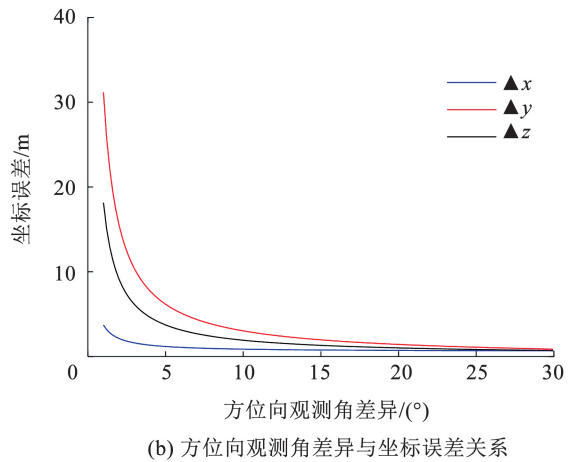


图9 观测角与坐标估计误差关系

Fig. 9 Relationship between observation angle and coordinate estimation error

仿真结果如图9所示,图9(a)与图9(b)中的结果均显示出随着观测角差异增大,坐标估计误差减小,结果呈现反比例函数形式:在观测角差异较小时,误差变化较大;当观测角差异增大后,坐标误差的变化逐渐减小,这表明观测角差异越大,目标坐标求解误差越小、精度越高。但是观测角差异越大,配准越困难,所以在估计坐标误差能够容忍的前提下,选择较小的观测角差。

5.2 目标三维成像仿真与分析

为验证本文算法的有效性,针对多散射点目标

开展三维成像仿真实验。实验采用 TerraSAR-X 卫星的真实轨道参数,选取其中两段轨迹进行聚束式成像,并基于本文算法完成三维重构。仿真时卫星下点轨迹如图10中红线所示,蓝色星号表示目标中心位置。目标点真实分布呈四棱锥形状,图12中空菱形所示。仿真参数如表2所示,在该参数设置下,SAR图像斜距向与方位向分辨率为0.5 m。卫星高度和速度由 TerraSAR-X 轨道参数确定,实验仅需两幅 SAR 图像即可完成处理。

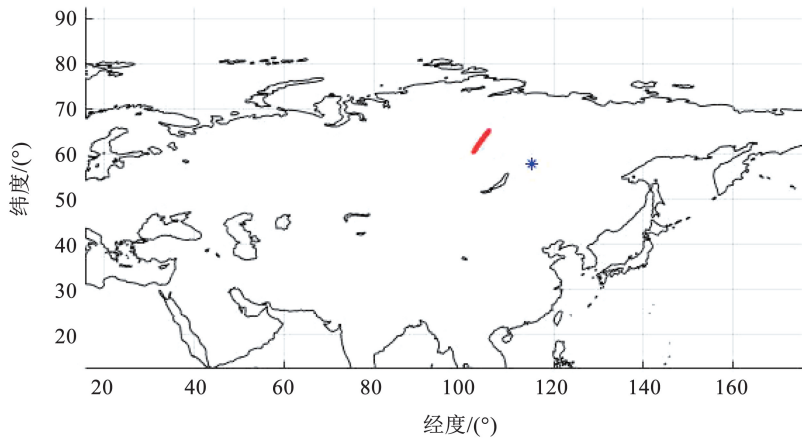


图 10 卫星星下点运动轨迹

Fig. 10 Satellite substar point trajectory

表 2 SAR 参数

Tab. 2 SAR parameters

参数	参数值
下视角	46.54°, 26.10°
脉冲重复频率	16 000 Hz
载频	10 GHz
带宽	300 MHz
采样频率	375 MHz
积累时间	3.712 s, 3.875 s
下视角向观测角差异	20.44°
方位向观测角差异	14.28°

图 11 为不同观测角度的 SAR 成像结果。由于两幅图像采用同一个成像平面,目标像素点的位置分布变化不大。图 12 中,实心圆点代表本文算法估计出的目标坐标。可以看出,在配准较为准确的前提下,本文算法能够有效地实现多角度 SAR 图像目标点三维重建。

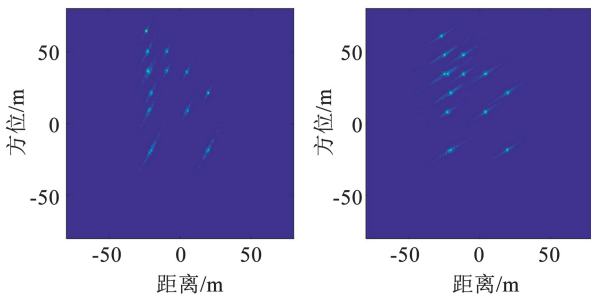


图 11 多角度 SAR 成像结果

Fig. 11 Multi-view SAR imaging results

在表 2 的仿真参数与相同卫星轨迹下,对复杂目标舰船进行三维重建仿真,舰船模型在成像中会出现叠掩现象,仿真中考虑了目标散射系数的各向

异性,但忽略了舰船目标的平动和自身转动。图 13 为舰船目标三维模型渲染图,图 14 为两幅不同观测角度的 SAR 成像结果,可见目标在不同视角下的散射特性存在明显差异。图 15 为本文算法三维重建结果,其中黄色面片表示舰船目标,实心圆点表示估计出的坐标点。本文算法能够有效重建舰船目标的三维重建,点云大部分分布在舰船目标边缘;对于舰船甲板等反射系数变化不大的平面,配准时难以匹配到正确点,导致该位置处缺少点云。

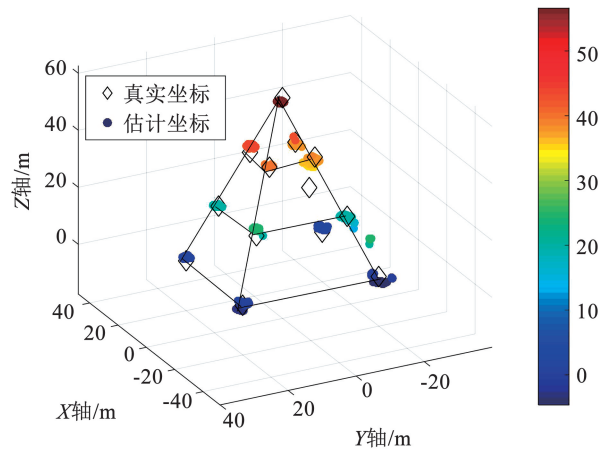


图 12 三维重构结果

Fig. 12 3D reconstruction results



图 13 舰船目标示意图

Fig. 13 Ship target diagram

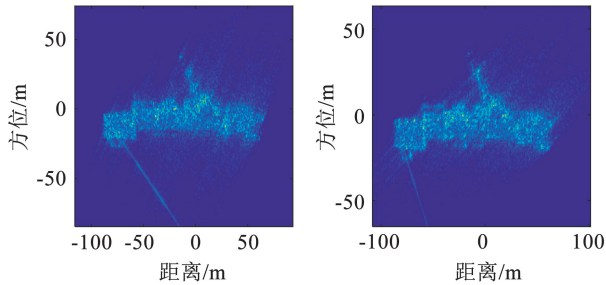


图14 舰船目标多角度SAR成像结果

Fig. 14 Multi-view SAR imaging resultsof ship

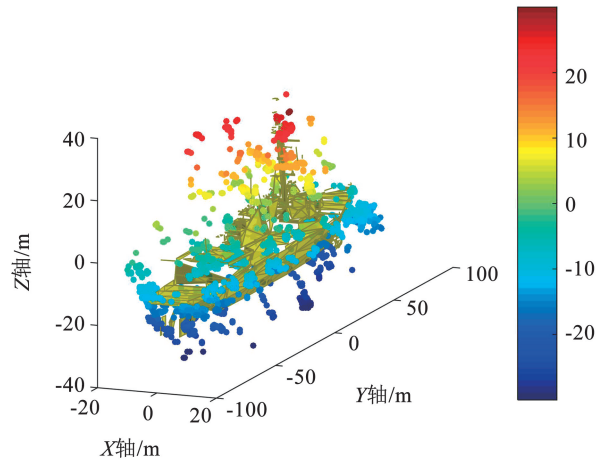


图15 舰船目标三维重构结果

Fig. 15 3D reconstruction results of ship

6 结 语

针对多角度SAR图像三维成像问题,本文提出基于本质矩阵变换的多角度SAR三维重建方法。该方法根据SAR轨道参数与成像场景计算出数学模型中的本质矩阵,随后脱离几何投影场景进行目标三维重建,相对于几何投影计算目标高度的方法,本文算法优化了求解过程,实现了端对端的多角度SAR三维重建。

参考文献

- [1] 邓云凯,禹卫东,张衡,等. 未来星载SAR技术发展趋势[J]. 雷达学报,2020,9(1):1
DENG Yunkai, YU Weidong, ZHANG Heng, et al. Development trend of future spaceborne SAR technology[J]. Journal of Radars, 2020, 9(1):1. DOI:10.12000/JR20008
- [2] 陈杰,杨威,王鹏波,等. 多方位角观测星载SAR技术研究[J]. 雷达学报,2020,9(2):205
CHEN Jie, YANG Wei, WANG Pengbo, et al. Research on spaceborne SAR technology with multi-azimuth observation[J]. Journal of Radars, 2020, 9(2):205. DOI:10.12000/JR20015
- [3] KNAELL K. Three-Dimensional SAR from curvilinear apertures[C]// Proceedings of the 1996 IEEE National Radar Conference. Ann Arbor, MI, USA, 1996:220. DOI:10.1109/NRC.1996.510684
- [4] 苏志刚,彭应宁,王秀坛. 曲线合成孔径雷达中散射点三维特征提取方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2005,45(7):947
SU Zhigang, PENG Yingning, WANG Xiutan. Method for extracting 3D features of scattering points in curvilinear synthetic aperture radar[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(7):947. DOI:10.16511/j.cnki.qhdx.2005.07.022
- [5] 苏志刚,彭应宁,王秀坛. 三维目标曲线SAR成像的降维搜索算法[J]. 电子与信息学报,2006,28(6):965
SU Zhigang, PENG Yingning, WANG Xiutan. Dimensionality reduction search algorithm for 3D target curvilinear SAR imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(6):965
- [6] 何峰,杨阳,董臻,等. 压缩感知曲线SAR孔径优化和目标三维特征提取[J]. 国防科技大学学报,2015,37(4):93
HE Feng, YANG Yang, DONG Zhen, et al. Aperture optimization and target 3D feature extraction for curvilinear SAR based on compressed sensing[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(4):93. DOI:10.11887/j.cn.201504016
- [7] ORIOT H, CANTALLOUBE H. Circular SAR imagery for urban remote sensing[C]//7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Friedrichshafen, Germany, 2008:1
- [8] LIN Y, HONG W, TAN W, et al. Airborne circular SAR imaging: Results at P-band[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich, Germany, 2012:5594. DOI:10.1109/IGARSS.2012.6352051
- [9] PALM S, ORIOT H M, CANTALLOUBE H M. Radargrammetric DEM extraction over urban area using circular SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(11):4720. DOI:10.1109/TGRS.2012.2191414
- [10] ZHANG J, SUO Z, LI Z, et al. DEM generation using circular SAR data based on low-rank and sparse matrix decomposition[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(5):724. DOI:10.1109/LGRS.2018.2809905
- [11] DUQUE S, BREIT H, BALSS U, et al. Absolute height estimation using a single TerraSAR-X staring spotlight acquisition[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(8):1401. DOI:10.1109/LGRS.2015.2422893
- [12] 周超伟,李真芳,王跃鲲,等. 联合多方位角调频率估计的星载SAR三维成像方法[J]. 雷达学报,2018,7(6):696
ZHOU Chaowei, LI Zhenfang, WANG Yuekun, et al. Spaceborne SAR 3D imaging method combined with multi-azimuth chirp rate estimation[J]. Journal of Radars, 2018, 7(6):696. DOI:10.12000/JR18094
- [13] 杨彦辉,林赞,洪文. 利用星载SAR单轨多角度地距图像提取高程信息[J]. 测绘科学,2019,44(7):96
YANG Yanhui, LIN Yun, HONG Wen. Extracting elevation information from spaceborne SAR single-track multi-angle ground range images[J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(7):96. DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2019.07.015
- [14] 张金强,秦强,宫俊,等. 星载全方位SAR联合图像配准和DEM提取方法[J]. 制导与引信,2020,41(1):16
ZHANG Jinqiang, QIN Qiang, GONG Jun, et al. Joint image registration and DEM extraction method for spaceborne full-aperture SAR[J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(1):16. DOI:10.3969/j.issn.1671-0576.2020.01.004

(编辑 丁晓清)