

ISAR图像的特征提取及应用研究

作者姓名 许志伟 导师姓名、职称 邢孟道 教授、张磊 副教授

一级学科 信息与通信工程 二级学科 信号与信息处理

申请学位类别 工学硕士 提交学位论文日期 2014 年 12 月

学校代码 10701
分 类 号 TN95

学 号 1202121063
密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文

ISAR 图像的特征提取及应用研究

作者姓名： 许志伟

一级学科： 信息与通信工程

二级学科： 信号与信息处理

学位类别： 工学硕士

指导教师姓名、职称： 邢孟道 教授

张 磊 副教授

提交日期： 2014 年 12 月

A Study of Feature Extraction and Applications Using Inverse Synthetic Aperture Radar Images

A thesis submitted to
XIDIAN UNIVERSITY
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master
in Information and Communication Engineering

By
Xu zhiwei
(Signal and Information Processing)
Supervisor: Prof. Xing mengdao and Associate Prof. Zhang lei
December 2014

西安电子科技大学
学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文若有不实之处，本人承担一切法律责任。

本人签名：_____ 日 期：_____

西安电子科技大学
关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属于西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅、借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，获得学位后结合学位论文研究成果撰写的文章，署名单位为西安电子科技大学。

保密的学位论文在____年解密后适用本授权书。

本人签名：_____ 导师签名：_____

日 期：_____ 日 期：_____

摘要

逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)技术通常利用微波数据获取高分辨率的雷达图像,其可以对诸如卫星、太空站、飞行器、船舰等空间和空天目标进行远距离、全天时和全天候的二维成像,并对目标进行探测与识别。由于 ISAR 成像技术不断地普及和深化,其应用范围也从最初的单一成像拓展为对目标部件、运动参数等更为细致的研究。当今,通过获取兴趣目标及其部件的几何结构、散射特性、运动状态与趋势等信息,对后续分析目标的有效载荷、类型识别以及部件分类等提供理论支撑与实践参考价值。本论文利用二维 ISAR 成像数据和图像为数字资源,以目标的特征提取、参数估计、部件结构融合和兴趣目标部件的检测为主线,对 ISAR 目标在几何尺寸、形态结构和部件信息方面进行了研究。本文以如下内容展开:

第一章介绍了本文的研究背景和目的,介绍了 ISAR 成像技术的发展过程和利用 ISAR 图像特征进行相关处理的概述,具体说明了本文主体部分工作安排。

第二章介绍了本文工作中所采用的特征点提取方式。通过模型分析并构建目标运动的代价函数,并利用评价准则获取高精度的相邻子孔径 ISAR 图像之间有效旋转角度,从而获取有效的方位向分辨率。之后,对目标进行定标,分析各部分结构的尺寸大小。同时,利用估计的参数,通过消除相位项方法,从而提高 ISAR 图像整体的聚焦效果。

第三章介绍了通过短相干处理时间下不同子孔径之间目标结构的分析、几何形态的变化和运动参数的估计,完成在长相干处理时间内的不同姿态角度下目标结构融合,以获取目标结构较为完善的 ISAR 图像,从而增强目标的可识别度与信息可分析性。首先,利用参数估计获取序列子孔径下的运动参数和几何形变尺寸,并以此对相应的 ISAR 图像进行几何尺寸校正和姿态统一化。之后,利用有效的数据融合方法对不同的结构进行能量阶平衡,从而获取清晰完善目标图像。

第四章介绍了利用 ISAR 图像进行目标局部兴趣部件的检测和识别。其利用目标的整体特征信息与目标部件库下的局部特征信息进行区域限定,通过逐步转移方法,获取每次配准下目标特征的概率精度。之后,通过最终的判断准则获取最佳的识别效果。该研究方法主要针对空间目标,其依赖于目标在 ISAR 图像中清晰的几何结构和相对较高的分辨率。

关键词: 逆合成孔径雷达(ISAR), 特征提取, 方位定标, 图像融合, 部件识别

论文类型：应用基础研究类

ABSTRACT

Inverse synthetic aperture radar (ISAR) is an imaging radar using microwave receiving data for the sake of high-resolution images for both space and aerial targets, such as satellite, space station, airplane, ship, etc. It can image, detect, and recognize targets in far-distance, all-time, and all-weather conditions. With the popularization of this technique, its applications expand from a unilateral imaging to in-depth surveys of target's components, motion parameter estimation, and so on. So far, it is valuable to study interesting components and their related geometric structures, scattering features, motion states for the theories and practice of analyzing effective loads, components classification, etc. In this thesis, we utilize two-dimensional ISAR data and images as digital resources to focus on features of targets, parameters estimation, components fusion and detection in order to analyze targets' physical sizes, status, and local structures. In what follows is the outline of this thesis:

Chapter 1 introduces the research background and purpose of this thesis. It concerns the synopsis of the development of ISAR imaging, the post-processing of ISAR images, and the works of our projects in detail.

Chapter 2 proposes the applications of feature extraction on cross-range scaling and phase autofocusing. These applications are based on the reconstruction of cost function of target's motion, followed by an evaluation to obtain highly accurate rotational angle between two sequential sub-aperture ISAR images. Upon these processes, we are ready to acquire effective cross-range resolution to conduct cross-range scaling and then estimate real size. Meanwhile, estimation of motion parameters by this method makes it available to improve the autofocusing performance through cancellation of phase items.

Chapter 3 proposes the processes of different sub-aperture data in short coherent processing intervals (CPIs), e.g., analysis of target's structures, geometric changes, motion parameter estimation. These results are applied into fusion of target's structures under long CPIs for a relatively complete ISAR image containing all possible structures to enhance the recognition accuracy and analyticity. We first estimate the motion

parameters and geometric distortion factor to acquire modified ISAR images after corrections of geometry and aspects. Then we adopt effective fusion to deal with sequential ISAR images with different imaged structures and energy levels to obtain an optimal ISAR image with all possible structures and a highly focusing quality.

Chapter 4 proposes a novel method for interesting components detection and recognition based on ISAR images. The first step is to conduct local registration with a feature framework by integral feature information and local feature information of template components. As the feature framework shifts, we calculate the corresponding probabilistic accuracy each time. Next, we evaluate the final detecting accuracy by a defined criterion. This survey attempts to deal with component detection of space targets due to their contrasty structures and relatively high resolutions of ISAR images.

Keywords: Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR), feature extraction, cross-range scaling, image fusion, component detection

Type of Dissertation: Applied Basic Research

插图索引

| | | |
|--------|----------------------------------|----|
| 图 2.1 | 目标旋转的方向模型..... | 8 |
| 图 2.2 | 微旋转目标的 2 维平面模型..... | 8 |
| 图 2.3 | 图像降采样模型..... | 10 |
| 图 2.4 | 相邻阶降采样图像的获取..... | 10 |
| 图 2.5 | 盒式滤波器..... | 10 |
| 图 2.6 | 滤波器金字塔构建模型..... | 10 |
| 图 2.7 | RANSAC 直线模型的建立 | 13 |
| 图 2.8 | 本章算法的流程图..... | 15 |
| 图 2.9 | 回波子图..... | 15 |
| 图 2.10 | 雷达视线扫过 2.56° 后的回波子图 | 15 |
| 图 2.11 | 基于欧氏距离的粗配准效果..... | 16 |
| 图 2.12 | 基于 RANSAC 精配准效果 | 16 |
| 图 2.13 | 转角估计曲线..... | 16 |
| 图 2.14 | 不同信噪比测试精度曲线..... | 16 |
| 图 2.15 | 点仿真的雅克-42 飞机模型图 | 16 |
| 图 2.16 | 几何定标图像..... | 16 |
| 图 2.17 | 回波子图..... | 17 |
| 图 2.18 | 雷达视线扫过约 1.5° 后的回波子图 | 17 |
| 图 2.19 | 基于欧氏距离的粗配准效果..... | 17 |
| 图 2.20 | 基于 RANSAC 精配准效果 | 17 |
| 图 2.21 | 雅克-42 平面图 | 17 |
| 图 2.22 | 几何定标图像..... | 17 |
| 图 2.23 | 运动目标模型..... | 19 |
| 图 2.24 | 具有距离向和方位向模糊原始图像..... | 20 |
| 图 2.25 | 经过本章方法处理后图像..... | 20 |
| 图 2.26 | 有效旋转角度-信噪比曲线 | 20 |
| 图 2.27 | 熵-信噪比曲线 | 20 |
| 图 2.28 | 具有距离向和方位向模糊原始图像..... | 21 |
| 图 2.29 | 经过本章方法处理后图像..... | 21 |
| 图 3.1 | 融合方法流程图..... | 25 |
| 图 3.2 | 方位向上进行形变校正结果..... | 26 |

| | | |
|--------|-----------------------------|----|
| 图 3.3 | 对应于图 3.2 的方位向尺度搜索的熵值曲线..... | 27 |
| 图 3.4 | 5 幅连续的 ISAR 图像 | 27 |
| 图 3.5 | 5 幅挑选出的 ISAR 图像 | 28 |
| 图 4.1 | 部件检测算法流程图..... | 35 |
| 图 4.2 | 三维仿真模型..... | 36 |
| 图 4.3 | 基于 SIFT 和 SURF 的特征点 | 36 |
| 图 4.4 | 累积检测率分布图..... | 37 |
| 图 4.5 | 累积检测率-旋转角度曲线图 | 38 |
| 图 4.6 | 平均检测率-旋转角度曲线图 | 38 |
| 图 4.7 | 累积检测率-信噪比曲线图 | 39 |
| 图 4.8 | 平均检测率-信噪比曲线图 | 39 |
| 图 4.9 | 利用全局特征检测方法和本章方法的结果对比..... | 40 |
| 图 4.10 | 不同信噪比下卫星舱体检测结果..... | 41 |
| 图 4.11 | 不同信噪比下卫星电池板检测结果..... | 41 |

表格索引

| | | |
|-------|--------------------|----|
| 表 2.1 | 仿真数据转角估计参数..... | 15 |
| 表 2.2 | 实测数据转角估计参数..... | 17 |
| 表 2.3 | 仿真数据参数..... | 20 |
| 表 2.4 | 实测数据参数..... | 21 |
| 表 4.1 | 系统仿真参数..... | 36 |
| 表 4.2 | 分步算法用时(单位: 秒)..... | 38 |

符号对照表

| 符号 | 符号名称 |
|------------|----------------|
| x | 横坐标 |
| y | 纵坐标 |
| \bar{x} | 均值横坐标 |
| \bar{y} | 均值纵坐标 |
| x' | 尺度变换后横坐标 |
| y' | 尺度变换后纵坐标 |
| x'' | 旋转变换后横坐标 |
| y'' | 旋转变换后纵坐标 |
| \dot{x} | 中心补偿后横坐标 |
| \dot{y} | 中心补偿后纵坐标 |
| \hat{x} | 加权横坐标 |
| \hat{y} | 加权纵坐标 |
| Δy | 纵向距离变化量 |
| p | 散射点 |
| θ | 相干时间内旋转角度 |
| t_m | 慢时间 |
| τ | 快时间 |
| T_m | 方位相干时间 |
| R | 雷达斜距 |
| $R_0(t_m)$ | 雷达到目标中心距离 |
| S | 线性调频信号 |
| T_p | 脉冲宽度 |
| γ | 调频率 |
| f_c | 载频 |
| h | 距离向匹配滤波器 |
| τ_0 | 时延 |
| e | 基频回波信号 |
| r_0 | 转台中心相对雷达相位中心距离 |
| ω | 旋转角速度 |
| κ_r | 距离向单元 |

| | |
|--------------------------|----------------|
| κ_α | 方位向单元 |
| M | 距离向尺寸 |
| N | 方位向尺寸 |
| ρ_r | 距离向分辨率 |
| ρ_a | 方位向分辨率 |
| c | 光速 |
| λ | 波长 |
| B | 发射信号带宽 |
| X | 特征点位置坐标 |
| η | 图像索引号 |
| k | 特征点索引号 |
| \mathbf{M} | 转移矩阵 |
| G | 尺度因子的高斯函数 |
| σ | 图像尺度 |
| L | 图像尺度空间 |
| I | 目标图像 |
| Υ | 目标点梯度大小 |
| ϑ | 目标点方向 |
| D | 高斯差分尺度空间 |
| \mathbf{H} | 快速 Hessian 矩阵 |
| L_{xx}, L_{xy}, L_{yy} | 二阶高斯导数与目标点卷积 |
| E | 特征点描述符向量欧氏距离 |
| \hat{E} | 特征点描述符向量最小欧氏距离 |
| Q | 特征点描述值数目 |
| L_1 | 第 1 幅图特征点数目 |
| L_2 | 第 2 幅图特征点数目 |
| ε | 特征描述值索引号 |
| \mathbf{S} | 尺度校正矩阵 |
| ΔF_d | 多普勒单元带宽 |
| W | 权值函数 |
| w | 特征点权值 |
| A | 目标点幅度值 |
| K | 匹配特征点对数 |
| C | 特征代价函数 |

| | |
|-----------------------|--------------------|
| ω_{eff} | 有效旋转角速 |
| φ | 方位向散射点相位 |
| φ_1 | 一次相位 |
| φ_2 | 二次相位 |
| En | 图像熵值 |
| n_1 | 图像行索引号 |
| n_2 | 图像列索引号 |
| N_1 | 距离向单元数目 |
| N_2 | 方位向单元数目 |
| I | 复图像 |
| u | 归一化复图像幅度值 |
| C | 有效特征坐标向量 |
| s | 方位向尺度因子 |
| \hat{I} | 逆旋转补偿后图像 |
| V | 图像向量 |
| L | 基向量 |
| H | 权值矩阵 |
| D_{KL} | Kullback-Leib 代价函数 |
| v | 图像向量 V 的元素 |
| l | 基向量 L 的元素 |
| h | 权值矩阵 H 的元素 |
| \Re | 维度数 |
| V | 特征向量 |
| W_L | 特征窗口长度 |
| W_H | 特征窗口宽度 |
| e | 特征点描述符的元素 |
| f_p | 加权高斯检测率 |
| \tilde{f} | 有效加权高斯检测率 |
| σ_p | 平均能量幅度 |
| Ra | 累积检测率 |
| Z | 有效配准特征点总数 |
| z | 有效配准特征点索引号 |
| \tilde{R} | 平均检测率 |
| Θ_1 | 子孔径数据预处理复杂度 |

| | |
|------------|-----------|
| Θ_2 | 图像特征提取复杂度 |
| Θ_3 | 特征窗口复杂度 |
| Θ_4 | 粗匹配复杂度 |
| Θ_5 | 检测率计算复杂度 |
| Θ | 部件检测算法复杂度 |
| O | 算法复杂度量级 |

缩略语对照表

| 缩略语 | 英文全称 | 中文对照 |
|--------|---|-----------------|
| ISAR | Inverse Synthetic Aperture Radar | 逆合成孔径雷达 |
| ALCOR | ARPA-Lincoln C-band Observables Radar | ARPA 林肯 C 波观测雷达 |
| RCS | Radar Cross Section | 雷达横截面 |
| SAR | Synthetic Aperture Radar | 合成孔径雷达 |
| DARPA | Defense Advanced Research Projects Agency | 国防部高级研究计划署 |
| ADEOS | Advanced Earth Observing Satellite | 先进地球观测卫星 |
| SIFT | Scale Invariant Feature Transform | 尺度不变特征变换 |
| RANSAC | RANdom SAMple Consensus | 随机采样一致性 |
| SURF | Speeded-Up Robust Features | 快速鲁棒特征 |
| MSE | Mean Square Error | 均方值误差 |
| RD | Range-Doppler | 距离-多普勒 |
| LPFT | Local Polynomial Fourier Transform | 局部多项式傅里叶变换 |
| FAST | Features from Accelerated Segment Test | 加速分割测试特征 |
| TIRA | Tracking and Imaging RAdar | 跟踪与成像雷达 |
| ODRCS | Orbit Debris Radar Correction System | 轨道残骸雷达校正系 |

目录

| | |
|--|-----------|
| 摘要..... | I |
| ABSTRACT | III |
| 插图索引 | V |
| 表格索引 | VII |
| 符号对照表..... | IX |
| 缩略语对照表..... | XIII |
| 目录..... | XV |
| 第一章 绪论..... | 1 |
| 1.1 逆合成孔径雷达成像技术发展背景..... | 1 |
| 1.2 ISAR 成像在国内外的的发展情况..... | 2 |
| 1.3 本文研究内容和意义..... | 3 |
| 第二章 基于局部图像特征的 ISAR 方位定标和自聚焦..... | 7 |
| 2.1 引言..... | 7 |
| 2.2 ISAR 定标算法..... | 8 |
| 2.2.1 ISAR 信号模型..... | 8 |
| 2.2.2 基于局部图像特征的转角估计..... | 9 |
| 2.2.3 仿真和实测数据结果..... | 15 |
| 2.3 基于运动速度估计的 ISAR 自聚焦方法..... | 17 |
| 2.3.1 信号模型及其分析..... | 18 |
| 2.3.2 仿真和实测数据结果..... | 19 |
| 2.4 本章小结..... | 22 |
| 第三章 基于运动参数估计和非负矩阵分解的 ISAR 图像融合..... | 23 |
| 3.1 引言..... | 23 |
| 3.2 序列 ISAR 图像融合算法..... | 24 |
| 3.2.1 基于运动参数估计的 ISAR 图像校正..... | 24 |
| 3.2.2 基于非负矩阵分解方式的 ISAR 图像融合..... | 25 |
| 3.3 仿真结果分析..... | 26 |
| 3.4 本章小结..... | 28 |
| 第四章 基于图像特征和高斯概率的空间目标部件检测 | 31 |
| 4.1 引言..... | 31 |
| 4.2 空间目标部件检测算法..... | 32 |
| 4.2.1 基于区域特征的图像特征点选择..... | 32 |
| 4.2.2 基于高斯概率的检测度分析..... | 34 |
| 4.2.3 算法流程图和复杂度分析..... | 34 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 4.3 仿真结果分析..... | 35 |
| 4.3.1 利用三维卫星模型分别检测舱体和电池板..... | 36 |
| 4.3.2 不同旋转角度下的目标检测..... | 38 |
| 4.3.3 不同信噪比下的目标检测..... | 39 |
| 4.4 本章小结..... | 42 |
| 第五章 总结与展望 | 43 |
| 参考文献..... | 45 |
| 致谢..... | 51 |
| 作者简介..... | 53 |
| 1. 基本情况..... | 53 |
| 2. 教育背景..... | 53 |
| 3. 攻读硕士学位期间的研究成果..... | 53 |

第一章 绪论

1.1 逆合成孔径雷达成像技术发展背景

空间目标的逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像技术是指采用发射的微波信号对太空卫星、航天飞机等人造目标实行宽带观测,以获得相应的高分辨雷达遥感图像,并以此利用散射机理对目标的后向散射特性进行分析,进一步得到兴趣目标运行姿态、几何形态、结构分布和相应的物理特性等。该技术为后期目标有效载荷和目标分类检测等提供理论依据和实践基础。

由于 ISAR 技术的对象通常为非合作目标,其所使用的雷达合成孔径较短,该领域短期研究较于欧美国家落后。最早的逆合成孔径雷达主要针对轨道目标进行成像,例如,美国西屋公司于 60 年代研发出的 ISAR 成像系统。之后,美国研发了林肯 C 波段观测雷达,即 ARPA-Lincoln C-band Observables Radar, ALCOR^[1],并作为首次使用的宽带成像雷达投入使用。在之后该技术发展中,林肯实验室率先获取高分辨率低空观测目标 ISAR 图像,并将研究领域从雷达横截面分析和分辨率处理不断延伸至模式识别与目标分类,为后续国防事项中的反导弹防御和目标侦测等重要领域奠定基础。同时,为了通过获得毫米波量级的回波数据获取更精确的毫米波 ISAR 目标图像,弹道导弹防御局于 1977 年开始构建 35GHz 和 94GHz 的双频毫米波成像雷达,并于 1992 年正式投入军事领域应用中。该成像雷达对 1m² 散射面积目标的跟踪距离大于 2000km。随着其信号带宽增加至 2GHz,对应获取 ISAR 图像在其距离向上分辨率精确至分米数量级。之后,美国国家海军实验室获取了高精度海面舰船高分辨 ISAR 图像。美国 V.C Chen^[2-5]和李健^[6]等在 90 年代通过时频原理和微多普勒分析对运动的刚体观测目标等进行 ISAR 成像,并对所得到的 ISAR 图像实行信息分析和技术改造。19 世纪开始,在半导体技术不断发展和普及应用的同时,雷达系统中数字信号处理性能和精度大大提高,极大促进了多频段、极化雷达等技术迅速发展^[7]。由于特定非合作目标成像技术在工程中应用需要有所提高,结合 SAR 和 ISAR 进行处理也不断热化和重要化。这使得基于 ISAR 成像技术对空间空天运动目标,比如飞机、卫星、太空站、海面舰船等,进行雷达成像奠定了基础^[8-10],其应用领域不断从国防拓展到民用系统中。至今,ISAR 成像数据分析和目标结果报告都已成为一种重要的微波遥感测量技术,在国家安全防御系统和民用目标监测等应用中日益重要。

1.2 ISAR 成像在国内外的的发展情况

针对利用 ISAR 成像技术获取空间空天目标的高分辨雷达图像技术中,美国等发达国家已较早对该技术进行研究和不断创新,并将其分析方式应用在对观测目标的物理运动路径的分析、部件识别和结构分类。继 60 年代美国国防部高级研究计划署(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)对西屋机构轨道目标成像系统开发与使用支持之后,相应领域的电器和航空机构等也不断对该技术应用并制造空间轨道目标 ISAR 成像雷达投入使用。之后,由美国麻省理工学院林肯实验室研发的 512MHz 信号宽度的 C 波段奥尔柯雷达^[11]于夸贾林靶场正式启用,该雷达被认为是当今首部具有良好远程距离成像性能的 ISAR 成像雷达。此后,林肯实验室借助该技术构建了相应的更具研究意义的空间监视组合网系统^[12-13],并在与 DARPA 合作下获取了低轨卫星系统下的高分辨 ISAR 图像^[14]。此后,美国部门曾利用研制的弗洛依德(Floyd)高分辨成像雷达提取出分辨率小于 1m 的由太阳能翼构成的散射中心,得到相应的目标结构信息,并进一步对该部件的运行情况进行监视、对故障排查。其中,该技术曾在获取的 ISAR 图像中检测出阿波罗飞船和空间实验室的太阳能帆板存在的机械运行故障并及时解决。相似地,德国 FGAN-高频物理研究所研发的 800MHz 带宽的 Ka 波段目标跟踪和成像雷达系于 1990 年投入使用,同时获取前苏联“礼炮-7”太空站再入情况和成像散射特性等一系列实时监测雷达图像^[15-16]。在随后公开的该 ISAR 成像雷达针对先进地球观测卫星(Advanced Earth Observing Satellite, ADEOS)的 ISAR 成像结果中,其成功精准地对空间卫星太阳能帆板和空间目标运动周期进行标注。除此之外,MIT 林肯实验室对所研制的赫斯台克辅助雷达^[17-18]进行深入创新和改造,使其具有超长带宽成像功能,并利用该系统对空间空天目标实行了高分辨率 ISAR 成像。至此,包括美国、德国在内的发达国家在高分辨 ISAR 成像技术及其领域应用中已有较长的历史和较为先进的研究成果。通过国外所发表的文献和记载中可以了解到更多关于 ISAR 目标成像处理在海面舰船等运动目标的成像检测和识别技术内容^[19-21]。另外,利用极化成像技术对观测目标的研究也极其重要。例如,美国 Lincoln 实验室利用全极化成像方式对地面目标进行成像,之后展开通道处理,从所获取的高分辨伪彩色极化 ISAR 图像中提取出高效可靠的地面目标检测和鉴别信息,并得出相应的研究结论^[20];欧洲学者也针对该项极化成像技术和目标鉴别等进行了进一步研究^[22-24]。应注意,极化成像技术在本质上是利用不同通道之间的极化信息,对不同物理散射特性目标进行分解和合成。该技术研究一般针对观测目标的几何形态认识和运动参数分析为核心,而对于复杂目标中的兴趣部件的提取和研究方面,在现有的公开资料中记载量相对较小,有待于进一步全面研究。

在 ISAR 成像系统构建和理论研究及其应用方面,相对于国外的发展,我国起步较晚,但水平在不断加强。具体地,在 ISAR 成像的系统构建中,我国利用已装备的多部先进宽带测量雷达对空间空天目标进行成像及分析,在实现效果上取得良好成绩。同时,在相应的理论研究及其应用方面,国内组成了包括西安电子科技大学、清华大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学、南京航空航天大学、南京理工大学等在内的多研究团队针对该领域的 ISAR 成像、图像研究、观测目标参数分析和目标分类识别等相关工作不断深入与拓展^[25-33]。至今,该领域的这些研究成果和影响都很大程度上对我国国防事项中的实际空间空天目标的 ISAR 成像与目标特征研究提取起到了重大作用和推动力,为深度强化提高了有力的理论基础。目前,空间空天目标在相对短相干时间内的雷达成像技术已逐步强化并不断成熟,其广泛应用与实际工程和研究项目中。由以上 ISAR 成像技术在国内外的现阶段的发展与未来趋势可见,目前我国所研究的空间空天目标 ISAR 成像技术正不断从原有的针对雷达回波信号成像高分辨率提高处理向实际工程中的利用 ISAR 图像获取目标物理结构和运动特征状态等信息的获取方向转变,该研究趋势也是当前国际在微波成像处理领域内的一个前沿研究方向。

1.3 本文研究内容和意义

在当今军事发展中,利用具有高精度侦查能力的同步轨道卫星和航天飞行器等设备对获取重要的军事情报有重要意义,是军事强国战略中的一种关键手段。随着该类军用设备在功能上的多样化和灵活化的增强,其应用也日趋普遍和成熟,在相应的空间信息对抗领域也日趋重要。在现阶段我国空天安全战略中,应不断强化利用空间空天目标探测与分析性能获取重要情报的能力和方法的深化。比如,有效对观测目标中的典型部件的功能和结构进行确认和分析;利用长相干时间下不同观测姿态对应的目标结构与运动姿态变化关系的建立确定目标实际的运动轨道,并与预期路径拟合。同时,该技术在民用方面的对观测目标探测分析性能能力不断强化,这一点便于利用对目标散射特性进行目标实际运动中工作状态检测和故障排查,以保证其有效安全地工作。总体而言,基于 ISAR 成像技术的空间空天目标几何结构确定、不同观测时间下运行姿态路径和连续观测时间内姿态变化趋势等特性的研究具有较高的研究价值。一般地,利用高分辨 ISAR 成像方式可获取全天时、全天候、远距离条件下高质量的 ISAR 图像^[34]。通常对观测目标发射微波段电磁波信号,收发的回波信号具有丰富完备的目标散射信息。在此基础上利用观测目标物理散射特性分析对其物理结构、散射特性、姿态变化和运动趋势等进行研究。然而在现有的理论研究报告和公开文献中提及的针对空间空天目标局部结构分析和相关的研究理论和应用较少,单一地利用简单模型分析观测目标而

忽略典型结构目标自身的特殊性，会造成所用方法具有较多局限性和大误差等致命问题。因此，可通过目标方位定标获取其几何尺寸，并以此为基础解决相应的典型目标结构分析、物理散射特性模型构建和分析、运动参数估计等问题，并进一步提升目标重要信息的获取和分析能力，从而对雷达成像体制在诸多相似问题的研究上面不断完善和创新。

通常情况下，在ISAR成像中方位向分辨率增强主要是通过增大观测过程中相干积累角，即加大有效观测时间，而对于运行轨迹和姿态未知的非合作目标，其目标大积累角成像仍存在很多困难。一方面，由于复杂合成孔径阵列流形，观测目标在空间运动中的姿态变化相对成像平面难以确定且不稳定，其会因外界干扰导致波动，在长观测时间下的目标有效转角变化较快，使得单一的二维转台模型不适用。另一方面，获取的雷达回波信噪比相对较低、其调制过程较复杂。通常，观测目标离发射雷达较远，受到大气传播媒介的干扰而降低回波信噪比，使得对雷达回波信号处理中运动补偿较为困难，难以达到高精度。同时，由于观测目标是快速运动且非合作，有碍于回波多普勒调制处理。然而，观测目标在空间运动中可表现出明显特征，故可根据轨道信息辅助、定位系统等手段进一步提高观测目标ISAR成像的处理效率和稳定性。由于空间目标具有特定的、较为稳定的运行轨道，其运行姿态相对成像坐标系较为稳定^[34]，使得获取的轨道坐标与姿态角度变化具有相关映射。因此，借助目标轨道定位信息获取目标运行过程中的姿态变化，并估计出对应的阵列流形，进一步提高观测目标ISAR成像方位向分辨率精度。此外，对于多通道极化体制下ISAR图像，其处理方式相比于单一通道ISAR图像而言，具有更丰富的、不同物理散射特性的散射点信息，其具有目标信息间的互补作用。通过不同通道间权衡可提高ISAR图像方位向上分辨率及目标信息完备性。因此，将观测目标物理散射特性及运动姿态变化趋势和发射雷达体制相结合用以优化雷达成像性能，在工程应用和实际研究中具有很高意义。

利用目标在图像领域内的特征信息，一方面能够反映出目标本身与所处观测环境的特征区别性，提取有效的特征信息；另一方面，针对不同结构类型的特征，结合多种特征提取方法有效地从多个结构类型对同一目标处理，增加处理过程精度与稳健性。然而，在处理观测目标 ISAR 图像过程中所面临问题主要有：

1) 在连续较长观测时间下，未能根据 ISAR 目标局部结构特点对完备的目标结构进行全面呈现。具体地，空间空天目标结构复杂，其雷达图像中像素可能包含多种不同类型的散射特性，不同局部部件具有不同散射特性。在不同观测时间对应不同姿态变化下的部件结构，使短相干时间下 ISAR 序列图像关联性差，难以获取观测目标完备结构，单一观测角度下信息量不足难以精确检测局部部件。

2) 观测目标散射机理对运动姿态依赖性较强。通常，观测目标典型部件散射

特性与其运动姿态相关, 实际运行中的部件相对成像平面的雷达视线姿态变化较为复杂, 特别是非合作目标, 其在雷达图像中呈现的较为复杂的散射特性, 即在不同运动姿态下具有不同散射特性。因此, 单一观测视角下的成像无法反映完备的目标部件散射点信息, 这对研究复杂目标中典型局部部件物理结构和运动参数带来困难。但该问题的提出对有效利用不同单视角下 ISAR 图像分析和运动理解提供了理论基础和实现依据。进一步而言, 典型目标部件的散射特性对连续运动姿态角变化的依赖性本质上是一种重要的属性关系, 对研究兴趣目标部件物理结构和运动参数估计本身具有较高价值。根据观测目标的材质特点, 典型部件通常具有相同物理散射特性, 这为同一种材质下的目标聚类融合及进一步的检测提高了可能。另外, 观测目标在相对长的相干时间具有的序列 ISAR 图像的成像平面变化对应于其轨道坐标。至此, 根据观测目标物理散射特性和运动姿态变化的关系进行复杂目标中典型部件的特征提取、检测分类和运动参数估计成为了一种可能, 同时该技术对实际工程应用也提供较深研究意义。

上述对本文整体内容和意义进行说明, 以下通过三点分别对本文正文的主要部分(即第二章至第四章)的内容及其研究意义具体地展开:

1) 基于观测目标运动姿态角度变化的物理特性模型、特征提取和局部部件检测。在现有观测目标结构分解建立的物理特性模型中, 一般采用的结构较为简单, 模型参数易于确定。其具有的好处是可以简便理论分析和明确参数的物理含义。但存在的不足是难以考虑观测目标局部部件的结构和其物理散射特性的视角依赖性。利用雷达电磁波相干姿态角度原理, 由于复杂目标中不同载荷具有不同几何物理结构和运行姿态, 散射特性对成像平面对应的视角变化相对敏感。通常, 应先根据需要建立可行的物理散射模型用以精确描述散射特性对视角的依赖性, 同时构建目标局部结构物理特性参数库和序列 ISAR 图像间特征对应关系。在此基础上更好地结合图像域中的目标特征实现较长观测时间下姿态角变化的目标特征提取与特征关系的建立。一般地, 观测目标局部部件的特征关系建立是指根据多视角下的散射特性变化对由特定局部部件贡献的目标图像像素和散射点信号确认, 实现图像中特征点像素和信号域部件特征点的提取, 从而实现不同观测时间下部件特征匹配和运动参数估计。目标局部部件特征对应的像素提取取决于不同结构部件在视角依赖下的散射特性变化, 其性能依赖于所提取特征的完备性和典型性。该实现方式包含多维度下信号模型构建、雷达图像特征提取和局部部件检测器设计, 同时应减小或避免不同目标信号之间的混叠和干扰, 尤其是针对结构相似但姿态不同的部件的检测。

2) 大积累角下的 ISAR 目标图像融合方式。在不同的观测时间下, 通过确定目标成像平面在方位向的尺度变化和成像坐标系配准和对齐, 利用部件的特征信息

进行长孔径下的目标融合。同时，利用融合过程对目标转动信息敏感的特点，还可为提高转角矢量估计精度提供新方法。因此，该融合是利用短孔径下的变化转角进行姿态对齐，而后利用不同观测时间下的目标结构能量特性进行全局方式的融合，避免了单一观测下的整体能量突变。

3) 基于运动目标姿态角度变化的物理散射模型分析和局部部件特征参数估计。高质量空间空天目标ISAR图像包含较为完备丰富的目标散射信息，尤其是复杂目标中典型的局部部件（如空间卫星太阳能翼、对地观测望远镜等）的物理散射特性对姿态变化表现出明显的敏感性。同时，该目标局部结构和运动姿态的变化的依赖性也体现在其物理散射机理随目标的运动姿态角度变化。因此，基于观测目标所提取的特征对典型局部部件的检测、衡量和参数估计至关重要。由于在单一观测角度下，利用观测目标ISAR图像仅根据一般物理模型进行局部目标部件检测具有局限性，对提取的目标散射特征点难以完备和精确。因此，本文通过相对较长的观测时间下获取空间空天目标的ISAR序列图像，从而研究观测目标典型局部部件结构和散射特性与运动姿态变化的关联性，并提出基于观测目标姿态角度变化的物理模型和目标典型部件的检测方法。

综上所述，对于空间空天目标ISAR成像及其图像处理，可利用典型的电磁散射机理模型及其概念分析，结合观测目标自身及其部件结构物理特性和散射特性，建立高效可实现的ISAR成像模块和相应的图像信息处理模块，从而获取高质量的完备的目标ISAR图像和所需研究的对象。同时，可以通过该电磁散射机理模型和信号模型进行关键参数（例如有效旋转角度、运动趋势等）估计，为观测目标的兴趣部件提取分析和属性参数的反演等研究建立理论基础和方案依据。

第二章 基于局部图像特征的 ISAR 方位定标和自聚焦

2.1 引言

利用 ISAR 成像技术可实现对空间空天目标的微波散射特性分析, 获得目标几何和尺寸等重要信息。由于 ISAR 成像利用目标相对雷达视线的有效转动形成合成孔径获得方位高分辨率, ISAR 成像后需要方位定标实现多普勒与方位尺寸的转换^[35]。ISAR 目标的刚体运动通常分为平动和转动分量, 平动对合成孔径的形成无贡献, 因此需要预先补偿。在较高频带载频(如: X 波段)的 ISAR 成像处理中, 通常利用较短相干处理时间即可获得高的方位分辨性能, 可视为目标在某一个平面进行匀速小转角度转动, 即可认为在较短的相干处理时间内有效转角速度为一常量。通过相干处理时间内有效转角速度的估计可实现 ISAR 成像的方位定标处理。一类重要的传统转角估计方法是信号域转角估计^[36-37], 此类方法通常假设匀速转台模型下, 转动分量引入不同距离单元存在线性变化的调频率, 通过信号域调频率估计可拟合目标转角速度大小, 继而实现 ISAR 成像方位定标^[38-39]。信号域参数估计的方法最大的问题在于算法对回波数据本身具有较强的依赖性, 当目标强散射中心较少或者回波数据质量不高时, 此类算法性能难以保持。通过图像匹配来估计相邻 ISAR 图像的旋转角估计, 是另一类较为有效的 ISAR 成像方位定标方法^[40], 但该方法需要对所有像素旋转和极坐标变换等运算复杂度较高的处理, 运算量非常大, 同时要求目标散射角度依赖性较弱。此外, 干涉 ISAR 通过对双天线接收的数据进行横向距离的比相法进行方位向的定标^[41]。

本文提出一种基于特征匹配的 ISAR 转角估计和方位定标方法。该算法结合了图像特征提取匹配的思路^[42-43], 对相邻 ISAR 图像用尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)和快速鲁棒特征(Speeded-Up Robust Features, SURF)提取特征点, 通过配对的特征点坐标估计相邻 ISAR 图像间转角。本文工作表明 SIFT 和 SURF 特征对微波 ISAR 图像有很好的稳定性和精确性。本文由以下部分组成:

- (1)利用信号模型找出目标姿态与图像信息关系, 构建代价函数并确定算法原则;
- (2)结合 Lowe 等人^[44]提出的 SIFT 和 Bay^[45]等人的 SURF 提取目标特征点信息;
- (3)通过相对位置校正去掉平动分量对于转角估计的影响, 并分别用基于欧氏距离的粗配准和基于随机采样一致性(RANdom SAmple Consensus, RANSAC)^[46-47]的精配准对提取的特征点进行特征点相关;
- (4)通过基于模型构建的图像信息的代价函数进行转角估计并精确定标。采用特征

匹配避免了直接信号域或图像变换处理，有效提升了转角估计的精确性和运算效率，同时提取的特征点具有很好的稳健性，能适应实际较低信噪比下 ISAR 方位定标处理。

2.2 ISAR 定标算法

2.2.1 ISAR 信号模型

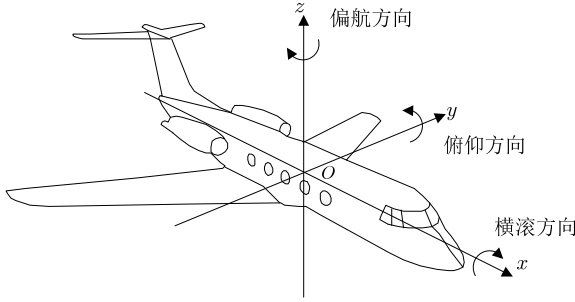


图 2.1 目标旋转的方向模型

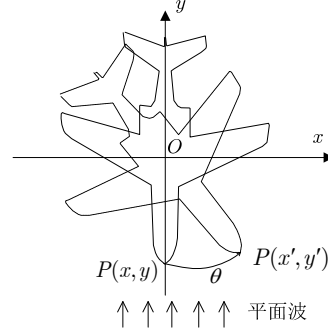


图 2.2 微旋转目标的 2 维平面模型

ISAR 成像中以目标运动过程中的有效转角矢量为轴确定 2 维转台成像平面，模型如图 2.1 所示。在合成孔径时间内，假设目标有效转角矢量不变，经过 T_m 时间，目标上某散射中心坐标 $P(x, y)$ 旋转至 $P(x', y')$ ，引入转角 $\theta = \theta(t_m)$ ，其中 t_m 为慢时间。纵向距离变化量 $\Delta y = -x \sin \theta(t_m) + y [\cos \theta(t_m) - 1]$ ，得雷达斜距为

$$R(t_m) = R_0(t_m) + x \sin \theta(t_m) - y \cos \theta(t_m) \quad (2-1)$$

其中，平动分量 $R_0(t_m)$ 为雷达到目标中心的距离。假定使用的雷达发射线性调频信号为

$$S(\tau) = \text{rect}[\tau / T_p] \times \exp(j\pi\gamma\tau^2) \times \exp(j2\pi f_c \tau) \quad (2-2)$$

其中， $\text{rect}[\bullet]$ 为窗函数， τ 为快时间， T_p 为脉宽， γ 为调频率， f_c 为载频。由线性调频信号得到距离向匹配滤波器 $h(\tau) = S^H(-\tau)$ ，其中 $[\bullet]^H$ 为复数共轭函数。假设时延 $\tau_0 = 2R(t_m)/c$ ，距离脉冲压缩后的基频回波信号为

$$\begin{aligned} e(\tau, t_m) &= \sum \text{IFFT}_{\tau} \{ \text{FFT}_{\tau} [S(\tau - \tau_0)] \text{FFT}_{\tau} [h(\tau)] \} \\ &= \sum \gamma T_p \text{sinc}[\gamma T_p(\tau - \tau_0)] \times \text{rect}[t_m / T_m] \times \exp[-j4\pi R(t_m) / \lambda] \end{aligned} \quad (2-3)$$

其中， T_m 为方位相干时间，设 $\text{sinc}[u] = \sin(\pi u) / (\pi u)$ 。对回波数据首先进行平动补偿，一般利用包络对齐与相位自聚焦技术^[48-49]。经过平动补偿处理后，瞬时距离改写为

$$R(t_m) = r_0 + x \sin \theta(t_m) - y \cos \theta(t_m) \quad (2-4)$$

其中， r_0 为转台中心相对雷达相位中心的距离。在小角度假设下 (3° 至 5°)，可得到以下近似： $\cos \theta(t_m) \approx 1 - \theta^2(t_m) / 2 = 1 - \omega^2 t_m^2 / 2$ 和 $\sin \theta(t_m) \approx \theta(t_m) = \omega t_m$ ，

则瞬时距离近似为

$$R(t_m) \approx r_0 - y + x\omega t_m + y\omega^2 t_m^2 / 2 \quad (2-5)$$

利用 Keystone 变换校正目标转动引入的距离走动^[50-51]。忽略常数项和二次项，进行距离压缩后信号为

$$e(\tau, t_m) = \sum \gamma T_p \text{sinc}\{\gamma T_p [\tau - 2(r_0 - y) / c]\} \times \text{rect}[t_m / T_m] \times \exp(j4\pi x\omega t_m / \lambda) \quad (2-6)$$

经过方位向傅里叶变换后得到的回波信号为

$$\begin{aligned} e(\tau, f_m) &= \text{FFT}_{t_m}[e(\tau, t_m)] \\ &= \sum_{(x,y) \in S} \gamma T_p \text{sinc}\{\gamma T_p [\tau - 2(r_0 - y) / c]\} \times T_m \text{sinc}[T_m(-2\omega x / \lambda + f_m)] \end{aligned} \quad (2-7)$$

简便起见，通过系数代换，信号离散表达式为

$$e(\kappa_r, \kappa_a) = \sum_{(x,y) \in S} T \times \text{sinc}[A_1(\kappa_r - y)] \times \text{sinc}[A_2(\kappa_a - x)] \quad (2-8)$$

其中， $\kappa_r \in [-M/2 : \rho_r : M/2]$ ， $\kappa_a \in [-N/2 : \rho_a : N/2]$ ， $A_1 = -2\gamma T_p / c$ ， $A_2 = 2\omega T_m / \lambda$ ， $\kappa_r = r_0 - c\tau / 2$ ， $\kappa_a = \lambda f_m / (2\omega)$ ，变换系数 $T = \gamma T_p T_m$ ， M 为距离向尺寸， N 为方位向尺寸，距离向分辨率 $\rho_r = c / (2B)$ ，方位向分辨率 $\rho_a = \lambda / (2\theta)$ ，其中 c 为光速， λ 为波长， B 为发射信号的带宽， $\theta = T_m \omega$ 为相干时间内转角。

从上述回波信号模型可见，可通过散射中心坐标位置的旋转变化来实现对目标转角速度 ω 的有效估计。根据图 2.2 所示，假设在同一雷达成像平面下，点目标坐标随转角的变化关系为

$$\begin{aligned} [X_1^1, X_2^1, \dots, X_n^1] &= \mathbf{M}(\theta) \times [X_1^2, X_2^2, \dots, X_n^2] \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \times [X_1^2, X_2^2, \dots, X_n^2] \end{aligned} \quad (2-9)$$

其中， $X_k^\eta = [x_k, y_k]^\top$ 为第 η 幅图像中经过转置的第 k 个特征点坐标位置，其中 $[\bullet]^\top$ 为实数转置函数， $\mathbf{M}(\theta)$ 为转移矩阵。综上可知，相干处理时间内目标转角可通过相邻孔径图像配准实现^[52]，即对某时刻 ISAR 图像旋转与相邻时刻 ISAR 图像配准来估计转角。

2.2.2 基于局部图像特征的转角估计

1) 特征点信息的提取算法

对于特征点的提取主要利用 SIFT 和 SURF。SIFT 提取的角点可提高目标几何中心的确定精度，但对角点不多的刚体目标通过双向配准后其特征点数不够，故引入 SURF 以提高有效特征点数目。

A. SIFT 特征点的提取算法

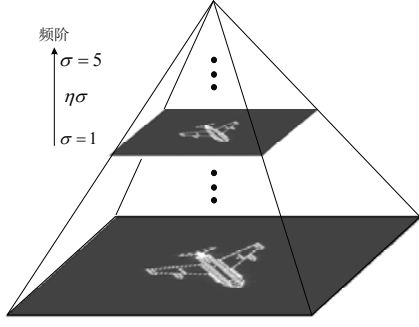


图 2.3 图像降采样模型

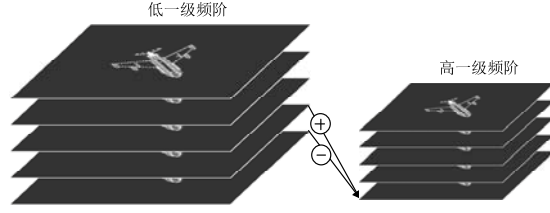


图 2.4 相邻阶降采样图像的获取

SIFT 算法采用高斯卷积核进行尺度变换得到图像相应尺度空间 $L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y)$ ，其中 $G(x, y, \sigma)$ 为尺度因子的高斯函数， (x, y) 为点位置坐标， σ 为点所在图像的尺度。再利用不同尺度的高斯差分核与图像卷积，得到相应的高斯差分尺度空间

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, \eta\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) = L(x, y, \eta\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (2-10)$$

之后对图像进行不同尺度上的降采样，提高特征点提取的抗噪性，同时实现图像尺度不变性；由同一频阶下相邻图像的差分图像寻找尺度空间极值点，并利用 2 维函数拟合得到精确的特征点，再利用提取的特征点周围图像的梯度方向直方图统计特性得到鲁棒性高的梯度方向，作为该特征点主方向。在点 (x, y) 处对应的梯度大小和方向分别为

$$G(x, y) = \sqrt{[L(x+1, y) - L(x-1, y)]^2 + [L(x, y+1) - L(x, y-1)]^2} \quad (2-11)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \{ [L(x, y+1) - L(x, y-1)] / [L(x+1, y) - L(x-1, y)] \} \quad (2-12)$$

将每个特征点所对应的图像坐标轴旋转到特征点的主方向，并且选取一定大小的窗口用以生成特征点的描述符向量。具体如下：以图像的像素为单位，对于当前一个特征点以每 $4 \times 4 = 16$ 个相邻的小块为一个种子点计算 8 个方向上的梯度方向和梯度大小，再以 $4 \times 4 = 16$ 个相邻的种子点对每个方向的梯度采用统计方法，得到 $64 \times 8 = 128$ 维的特征数据并以此作为 SIFT 描述符向量。这样得到的描述符向量采用了梯度方向上的统计方法，对图像的旋转、缩放等变化具有较好的鲁棒性。

B. SURF 特征点的提取算法

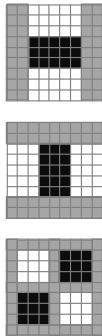


图 2.5 盒式滤波器

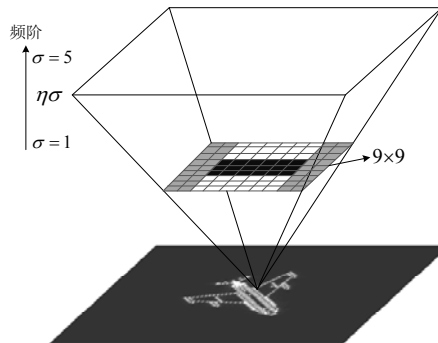


图 2.6 滤波器金字塔构建模型

由于 SIFT 的角点包含目标特征，但其数目不足以提高转角估计的精度，故引

入 SURF。SURF 采用快速 Hessian 矩阵，提高了效率和精确度。对图像 I 的点 $p = (x, y)$ ，它在尺度 σ 的快速 Hessian 矩阵 $\mathbf{H}(p, \sigma)$ 为

$$\mathbf{H}(p, \sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(p, \sigma) & L_{xy}(p, \sigma) \\ L_{xy}(p, \sigma) & L_{yy}(p, \sigma) \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

其中， $L_{xx}(p, \sigma)$ 为点 $p = (x, y)$ 处二阶高斯导数 $\frac{\partial^2}{\partial x^2} g(\sigma)$ 和点的卷积， $L_{xx}(p, \sigma), L_{xy}(p, \sigma), L_{yy}(p, \sigma)$ 相似。由于理论的滤波器在实际应用中不理想，利用 Lowe 的 LoG^[44] 近似，即盒式滤波器近似 Hessian 矩阵，并通过滤波器尺度变换形成滤波器金字塔对目标图像卷积。在尺度空间内，每一点对应的 Hessian 矩阵行列式值

$$\det(\mathbf{H}) = D_{xx}D_{yy} - (0.9D_{xy})^2 \quad (2-14)$$

通过对滤波器进行 5 个频阶的尺度空间变换，在同一频阶下选取 $\det(\mathbf{H})$ 大于上下相邻近的 26 个点所对应的点即为极值点，此类似于 SIFT 中极值点的确定。每个频阶通过 4σ 大小的 Haar 小波响应在当前特征点周围半径为 6σ 内的扇形内搜索，得到包含点数最多的方向作为特征点的主方向；将描述向量按照 4×4 等分成 16 个窗口，每个窗口采用 5×5 等分的 25 个像素，计算每个像素的 2σ 的 Haar 小波和 x, y 方向的小波响应得到和向量 $[\sum dx, \sum dy, \sum |dx|, \sum |dy|]$ ，最终得到每个特征点相应的特征点描述符向量。

2) 特征点配准算法

A. 基于特征描述向量的粗配准算法

由于不同图像上同一个目标的特征描述符向量在理论上是相近的，可以根据其特征描述符向量最近原则来配准，一般常用的是利用两个特征描述符向量的欧氏距离并满足一定阈值范围作为配准的有效方法。两个不同特征点描述符向量对应的欧氏距离为

$$\text{Dis}_{i,j}(\varepsilon) = \|X_{i,\varepsilon}^1 - X_{j,\varepsilon}^2\| = \sqrt{(x_{i,\varepsilon}^1 - x_{j,\varepsilon}^2)^2 + (y_{i,\varepsilon}^1 - y_{j,\varepsilon}^2)^2} \quad (2-15)$$

其中， $i \in [1, L_1], j \in [1, L_2], \varepsilon \in [1, Q]$ ， $X_{i,\varepsilon}^1$ 为第 1 幅图像中第 i 个特征点的特征描述向量的第 ε 个特征描述值， $X_{j,\varepsilon}^2$ 为第 2 幅图像中第 j 个特征点的特征描述向量的第 ε 个特征描述值， x 和 y 分别为 X 的横纵坐标值， L_1 为第 1 幅图提取特征点数目， L_2 为第 2 幅图提取特征点数目， Q 为特征点描述值数目，参考值为 128。

在小转角下，通常以阈值范围内的最小欧氏距离作为准则估计小转角。但对于大转角，即整体欧氏距离都比较大时，该准则并不可行。然而，同一特征点在不同转角下的欧氏距离变化不大，故采用准则

$$\begin{aligned} \|X_i^1 - X_j^2\| &= \begin{bmatrix} \sum_{\varepsilon=1}^Q E_{1,1}(\varepsilon)/Q, & \cdots, & \sum_{\varepsilon=1}^Q E_{1,L_2}(\varepsilon)/Q \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{\varepsilon=1}^Q E_{L_1,1}(\varepsilon)/Q, & \cdots, & \sum_{\varepsilon=1}^Q E_{L_1,L_2}(\varepsilon)/Q \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{E}_1 \\ \vdots \\ \hat{E}_{L_1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-16)$$

仿射关系 Γ 为

$$\hat{E}_i = \frac{\min \left[\sum_{\varepsilon=1}^Q \frac{E_{i,j}(\varepsilon)}{Q} \right]}{\text{hyp-min} \left[\sum_{\varepsilon=1}^Q \frac{E_{i,j}(\varepsilon)}{Q} \right]} < Gate \quad (2-17)$$

其中, \hat{E}_i 为最小欧氏距离, $\min[\bullet]$ 为最小值函数, $\text{hyp-min}[\bullet]$ 为次小值函数, $Gate$ 为阈值 0.95。

本文算法采用双向匹配避免由匹配方向引起不同的特征点匹配数目而造成算法不稳定。尽管双向匹配会减少匹配的特征点数目, 但是上述基于欧氏距离的配准准则可获取足够高的配准精度, 因此可采用双向匹配剔除错误大的匹配对。本文的转角估计要求足够的特征点精确匹配, 使得代价函数整体偏差不大。

B. 基于 RANSAC 的精配准算法

由于提取的特征点具有不同能量, 会引起粗配准特征点仍存在因低能量而造成失配。利用小转角下合成孔径数据中同一散射点在图像中小的位置变化, 采用基于位置坐标的精配准, 一般用均方值误差(Mean Square Error, MSE)^[53]。但该算法对线性特征点才具有良好效果, 对于波动或者非线性特征点的位置坐标会因均值不等于最佳值(即包含最多点下的均值)而导致失配, 故采用 RANSAC^[46], 以渐近线范围内包含点数最多的特征点为精配准结果。

以粗配准的特征点的欧式距离为数据库, 采用 RANSAC 进行本文的精配准算法: 首先初点集为随机选取的两个数据点, 计算其相应的初始直线模型; 记录该直线模型在参考噪声 $NE=0.01$ 范围内局内点与局外点的比值; 以此类推, 对所有数据点进行数据点的随机选取和局内点与局外点的比值计算, 得到比值最大的直线模型; 最后重新计算局内点形成的模型, 得到最佳直线模型。如图 2.7 所示, 所测数据库为本文仿真数据粗配准后特征点的欧氏距离, 黑色圆点为局内点, 即最佳直线模型在参考噪声范围内所包含的有效数据点; 黑色十字为局外点, 表示最佳直线模型外的无效数据点。

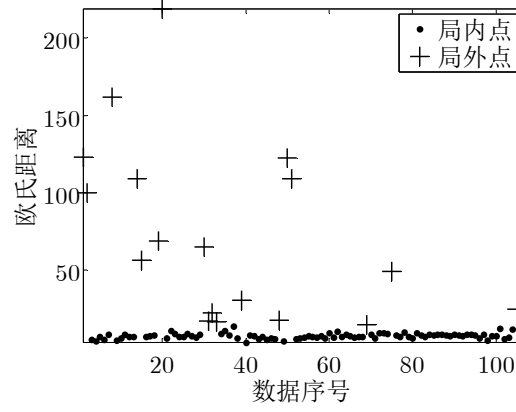


图 2.7 RANSAC 直线模型的建立

C. 基于代价函数的转角估计

为了克服平动分量在相邻子孔径的 ISAR 图像中引入的特征点几何中心的偏差, 需要对特征点坐标进行几何中心归一化。通常利用图像中具有最大互相关函数值的像素点作为目标的几何中心点^[40], 而根据局部特征点的性质, 本文利用精确配准特征点的均值坐标 $[\bar{x}_k^1, \bar{y}_k^1]$ 和 $[\bar{x}_k^2, \bar{y}_k^2]$ 作为几何中心。第 1 幅图和第 2 幅图中精确配准的第 k 个特征点对的位置坐标 $[x_k^1, y_k^1]$ 和 $[x_k^2, y_k^2]$ 经过几何中心归一化后变为

$$[\hat{x}_k^\eta, \hat{y}_k^\eta] = [x_k^\eta, y_k^\eta] - [\bar{x}_k^\eta, \bar{y}_k^\eta] \quad (2-18)$$

其中, $\eta=1,2$ 为 ISAR 图像索引号。由于不同的旋转角度会引入成像平面在方位向上尺度的变化, 为了减小其引入的代价函数误差, 需要进行角度搜索, 引入尺度校正矩阵 \mathbf{S}_l

$$\mathbf{S}_l = \begin{bmatrix} \rho_{al} / \rho_r & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \rho_{al} = \Delta F_d \lambda / (2\theta_l), l = 1, 2, \dots, 128 \quad (2-19)$$

其中, ρ_{al} 为第 1 幅图的方位向分辨率, ρ_r 为第 2 幅图的距离向分辨率, ΔF_d 为多普勒单元带宽, θ_l 为搜索转角。利用尺度校正矩阵 \mathbf{S}_l , 进行尺度变换后的特征点位置坐标为

$$[x_k^{\eta'}, y_k^{\eta'}] = [\hat{x}_k^\eta, \hat{y}_k^\eta] \times \mathbf{S}_l \quad (2-20)$$

同时, 利用搜索转角 θ_l 和式(2-9)中的转移矩阵, 将第 2 幅图像中的特征点位置坐标 $[x_k^{2'}, y_k^{2'}]$ 进行角度为 θ_l 的位置坐标旋转, 得到旋转后的位置坐标为

$$[x_k^{2''}, y_k^{2''}]^T = \begin{bmatrix} \cos \theta_l & \sin \theta_l \\ -\sin \theta_l & \cos \theta_l \end{bmatrix} \times [x_k^{2'}, y_k^{2'}]^T \quad (2-21)$$

由于大能量的目标点在微旋转后其能量值变化不大, 其对转角估计作用比小能量点大。因此, 在特征点粗配准中失配部分通常由小能量点造成。基于这一现象, 通过权值函数提高大能量点在转角估计的比重而降低小能量点的比重, 权值函数为

$$W_k = \left\lfloor 20 \times \lg \left(\frac{w_k^v + w_k^{v+1}}{2} \right) \right\rfloor, w_k = |A_k|^{0.25} + 1 \quad (2-22)$$

其中, w_k 为经验公式修正后的第 k 个特征点权值, A_k 为点幅度值。构建出的特征代价函数 C 的表达式为

$$C = \sum_{k=1}^K W_k \times \sqrt{(x_k^{2''} - x_k^{1'})^2 + (y_k^{2''} - y_k^{1'})^2} \quad (2-23)$$

其中, K 为匹配对数。经过加权处理的特征点利用搜索法进行逆旋转获取匹配对的位置偏差, 通过代价函数判决。搜索法中, 首先利用 128 个预设值进行初步转角估计, 再利用迭代进一步搜索以提高估计转角的精度, 为了减小迭代引入的坐标尺度变化, 引入式(2-23)。最后, 将最小代价函数对应的转角视为最佳估计转角。

步骤: 1) 图像预处理。将雷达回波数据在方位向截取一定的脉冲数, 利用传统的距离-多普勒成像算法得到序列图。为了降低噪声对图像的影响, 利用高斯滤波器对序列图进行去噪处理。由于本文中特征点提取方法对于图像灰度具有强鲁棒性, 滤波后的图像不会影响特征点信息的提取;

2) 特征点信息的提取。利用 SIFT 算法和 SURF 算法依据各自的特征点信息提取原理, 得到图像上目标特征描述符信息。其中, SIFT 算法得到代表目标角点的特征点, SURF 算法得到目标基于梯度变化的特征点;

3) 特征点的配准。微旋转序列图的特征点描述符变化较小, 首先由步骤 2) 得到的特征点经过基于描述符的欧氏距离准则进行粗配准, 门限为 0.95。由于部分能量小的特征点在转动后无法在图中被提取出来, 会造成粗配准后仍存在失配, 引入 RANSAC 算法进行精配准, 门限为 0.01, 最低迭代次数为 100;

4) 搜索算法估计转角。利用精配准后的特征点对的位置坐标, 采用基于代价函数最小准则, 通过 5 次迭代, 搜索出最佳转角。之后利用估计的转角计算方位向分辨率, 并进行定标处理。

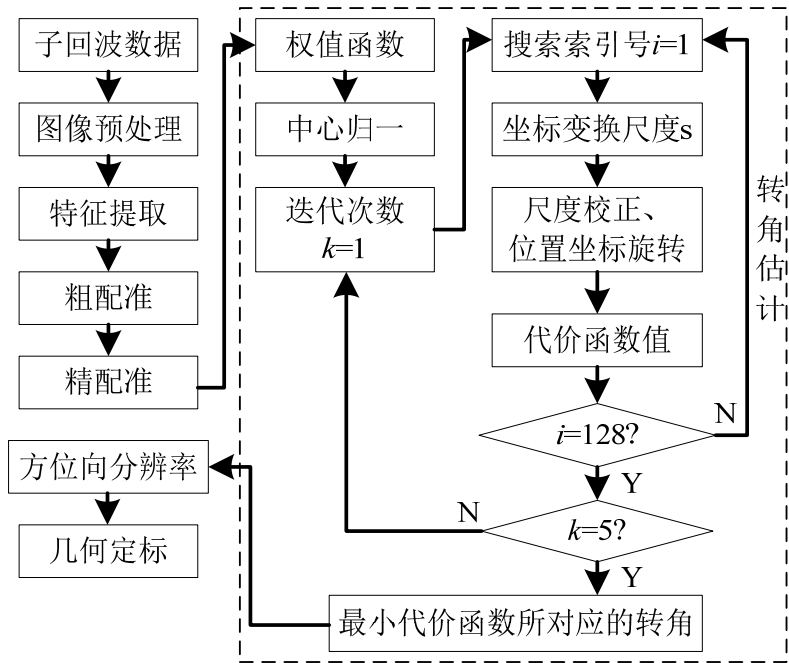


图 2.8 本章算法的流程图

2.2.3 仿真和实测数据结果

1) 仿真数据验证

由于 3 维雅克-42 飞机模型具有 3 个方向上的旋转角度，即俯仰角、偏航角和横滚，利用刚体目标的小转动特性可估算出目标在偏航方向上的角度，即为姿态变化的旋转角度。仿真参数如表 2.1 下

表 2.1 仿真数据转角估计参数

| 回波数据 | 图像大小 | 波长 | 带宽 | 脉冲重复频率 | 多普勒脉宽 | 时间间隔 |
|---------|---------|---------|--------|--------|----------|---------|
| 256×256 | 512×512 | 0.0333m | 500MHz | 100Hz | 0.3906Hz | 2.5600s |

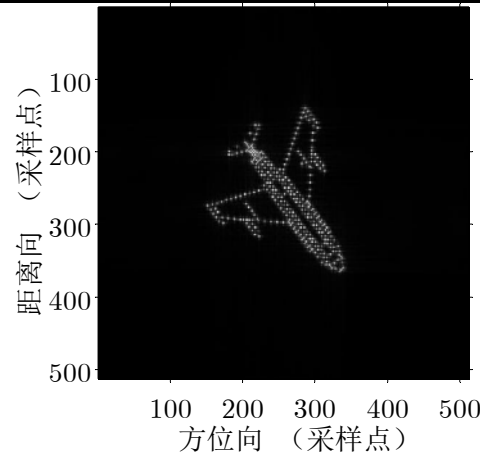


图 2.9 回波子图

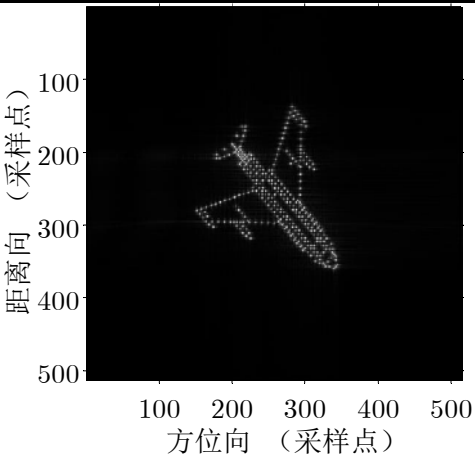


图 2.10 雷达视线扫过 2.56°后的回波子图

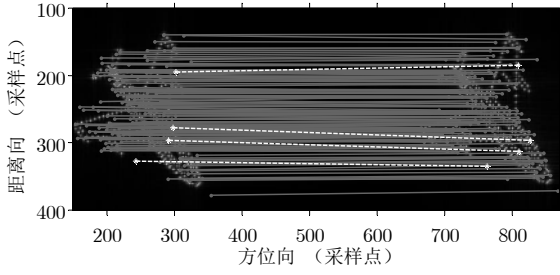


图 2.11 基于欧氏距离的粗配准效果

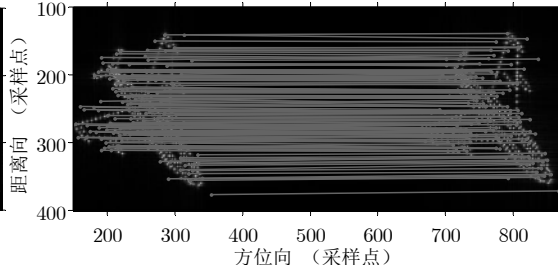


图 2.12 基于 RANSAC 精配准效果

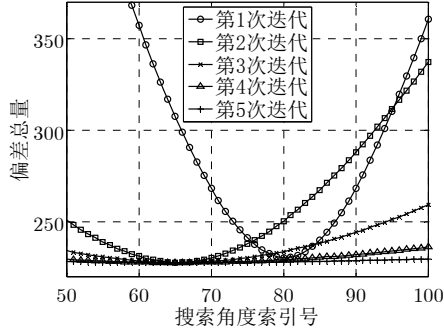


图 2.13 转角估计曲线

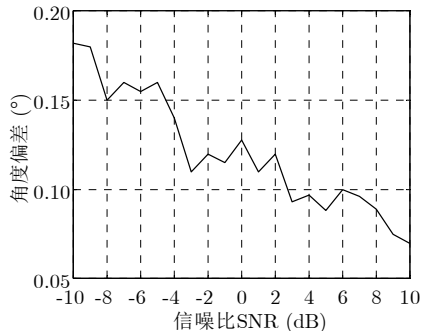


图 2.14 不同信噪比测试精度曲线

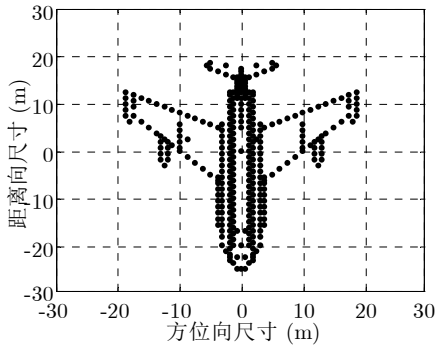


图 2.15 点仿真的雅克-42 飞机模型图

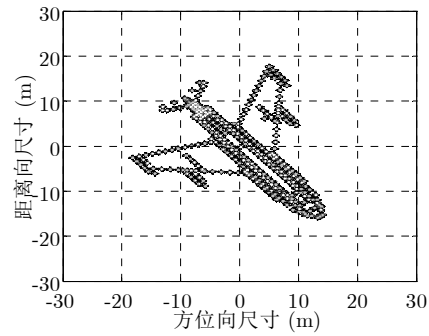


图 2.16 几何定标图像

图 2.9 和图 2.10 中, 分别提取了 146 个特征点, 经过粗配准和精配准后配对 142 个特征点, 精配准剔除了图 2.11 中白线部分的失配点, 使得匹配结果更为精确; 图 2.13 的 5 次迭代中, 代价函数最小时所对应的估计转角约为 2.4877° , 与实际转角 2.56° 的误差率为 2.8225%; 图 2.14 研究对回波数据加入不同程度的高斯噪声下其对转角估计的高精确性, 对于低信噪比 SNR 为 -10 dB 的情况下, 角度偏差仍可以保持在 0.1° 以内; 从图 2.15 和图 2.16 的定标结果来看, 模型飞机的实际机身长为 38 m, 机翼长为 35 m, 估计的机身长约为 38.1442 m, 机翼长约为 35.4251 m, 与实际尺寸的误差分别为 0.38% 和 1.21%。在实际的转角估计应用中 2.8225% 的精度验证了本文算法的有效性。

2) 实测数据验证

利用距离-多普勒(Range-Doppler, RD)算法和高斯滤波得到相邻雅克-42 飞机子孔径如图 2.17 和图 2.18 所示。由于平动分量和转角较小, 两者整体姿态变化不大, 但局部姿态变化大。因为即使转角较小, 若雷达视线与目标位置恰好使散射

点回波能量很弱，则所得点能量较弱。实际转角约为 1.5° ，参数如表 2.2 所示。

表 2.2 实测数据转角估计参数

| 回波数据 | 图像大小 | 波长 | 带宽 | 脉冲重复频率 | 多普勒脉宽 | 中心时间间隔 |
|---------|---------|----------|---------|--------|-----------|----------|
| 256×128 | 512×512 | 0.0333 m | 400 MHz | 100 Hz | 0.7813 Hz | 1.2800 s |

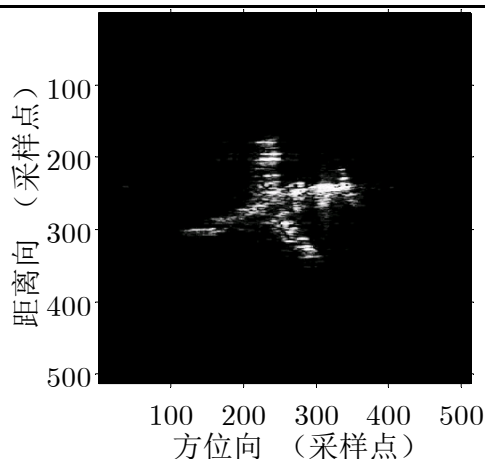


图 2.17 回波子图

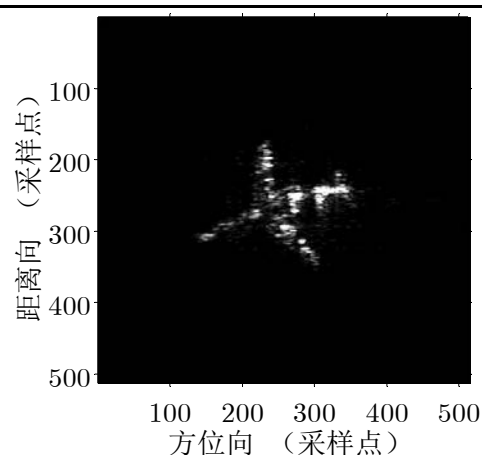


图 2.18 雷达视线扫过约 1.5° 后的回波子图

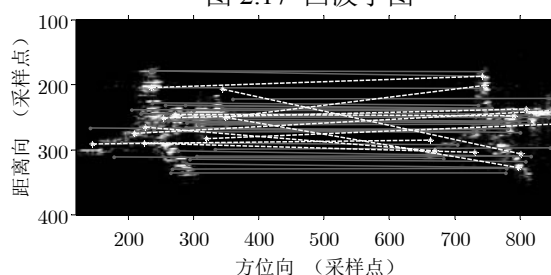


图 2.19 基于欧氏距离的粗配准效果

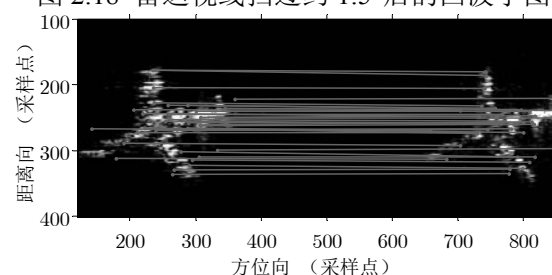


图 2.20 基于 RANSAC 精配准效果

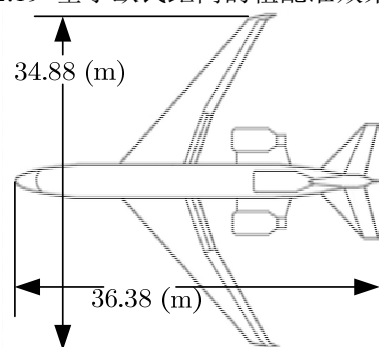


图 2.21 雅克-42 平面图

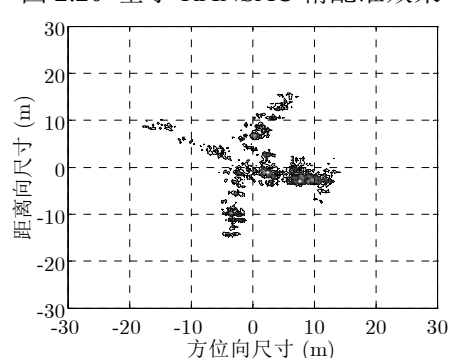


图 2.22 几何定标图像

针对图 2.17 和图 2.18，本算法提取 52 个特征点，经过粗配准和精配准后保留 43 个特征点，在 5 次迭代中，代价函数最小时所对应的估计的转角约为 1.7077° ，即 0.0298 rad 。从图 2.21 和图 2.22 的定标结果看，雅克-42 的机身长约为 35.51 m，机翼长约为 33.82 m，与实际误差分别为 2.39% 和 3.04%，验证了算法的有效性。

2.3 基于运动速度估计的 ISAR 自聚焦方法

在研究非合作目标(如民用飞机、战斗机等)中,逆合成孔径雷达技术通常利用回波信号获取高分辨率的微波图像。对于一幅 ISAR 图像而言,其分辨率主要有两个成分组成:距离向分辨率和方位向分辨率。为了获取精度高的距离向分辨率,可以通过采用大带宽的雷达发射信号。而为了获取高精度的方位向分辨率,通常需要采用沿着雷达视角方向上的较大的方位向旋转角度。

对于非合作目标而言,其对应的 ISAR 图像通常存在距离向和方位向上的散焦,这是由于目标在运动过程中平动分量和旋转分量造成。其中,平动分量主要在距离单元引起较大的模糊,其可利用包络对齐^[54]和相位自聚焦^[55]技术去除。而对于旋转分量引起的方位向上的模糊,需要进行距离徙动校正^[56]。

对于克服方位向散焦问题,可利用多种现有方法及相应的改进方法。Micro^[38]提出了一种通过相关系数估计有效旋转角速度,从而去除模糊分量。该方法主要基于图像分割、局部多项式傅里叶变换(Local Polynomial Fourier Transform, LPFT)和图像对比度最大化方法。但是,该方法在距离单元上的相关系数波动性较强,对于获取稳定值仍具有较大局限性。同时, Park^[57]提出了一种利用二维傅里叶变换和极化坐标图像转换的方法,并结合Nelder-Mead和 θ 方向角度估计出对应的有效旋转角速度。然而,该方法在处理具有相对较大的方位向尺度变换的ISAR数据时具有严重的偏差,尤其是对于预处理的第一步骤而言。类似地,文献^[31]中提出的利用相邻图像旋转相关系数的方法能够较为准确地估计出相邻ISAR图像的旋转角度。但是,由于所使用的ISAR图像中的目标中心未知,该方法在实际应用中存在旋转中心难以准确估计的问题。

针对这些问题,本文提出了一种利用图像域中目标高能量散射点进行有效旋转角速度的估计。该方法通过匹配的特征点估计出目标的旋转中心和旋转角度。由于特征点是目标的局部特征点,并通常针对高能量的散射点,因此相比于在信号域中或者对全局特征点进行直接处理,其具有较小的计算量。对于选取的两幅相邻ISAR图像,其在雷达视角方向上旋转角度不应过大;否则,将会导致同一部分的结构在两幅相邻ISAR图像中存在缺失或者严重变形,这将导致特征点提取方法的失效或者大误差。因此,我们可将其视为匀速转台,具备的两个条件如下:

- 1)在短相干处理时间内,目标旋转运动视为恒定运动。同时,所利用的两幅相邻ISAR图像具有相似成像平面;
- 2)在单一方向上的旋转角度不会很大,通常保持在3度到5度之间。

2.3.1 信号模型及其分析

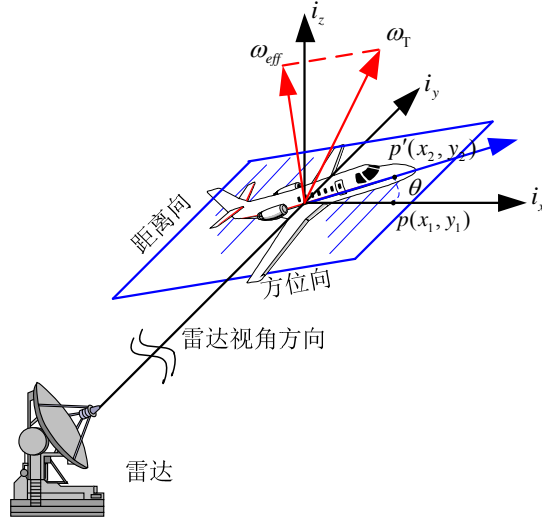


图 2.23 运动目标模型

从图 2.23 中可以看到，一个散射点从 $p(x_1, y_1)$ 运动到 $p'(x_2, y_2)$ ，对应相干处理时间下的旋转角度为 $\theta(t_m)$ 。同时，雷达与目标瞬时斜距约为 $R(t_m) = R_0 + x_1 \sin \theta(t_m) + y_1 \cos \theta(t_m)$ ，其中 R_0 是成像平面中心与雷达的距离， t_m 是方位向上的慢时间。由于 $R_0 \gg \Delta y = y_2 - y_1$ ，雷达斜距 $R(t_m)$ 由以下修正

$$\cos \theta(t_m) \approx 1 - \frac{1}{2} \omega_{eff}^2 t_m^2 \quad (2-24)$$

$$\sin \theta(t_m) \approx \omega_{eff} t_m \quad (2-25)$$

得到修正后的雷达斜距为

$$R(t_m) = R_0 + y_1 + x_1 \omega_{eff} t_m - \frac{1}{2} y_1 \omega_{eff}^2 t_m^2 \quad (2-26)$$

方位向上的散射点相位为

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m) = \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + y_1 + x_1 \omega_{eff} t_m - \frac{1}{2} y_1 \omega_{eff}^2 t_m^2 \right) \quad (2-27)$$

其中， λ 为波长。等式(2-27)中的相位由两部分组成：一次相位 $\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} x_1 \omega_{eff} t_m$ 和二次相位 $\varphi_2 = -\frac{2\pi}{\lambda} y_1 \omega_{eff}^2 t_m^2$ ，该相位需要进行补偿。具体地，通过 Keystone 算法^[50]补偿距离走动后，其二次相位通过估计出其对应的有效旋转角速度 ω_{eff} 补偿。

2.3.2 仿真和实测数据结果

实验采用仿真 MIG-25 数据和实测 Yak-42 数据进行。该部分数据预先经过包络对齐和相位自聚焦进行平动分量补偿。对于利用提出的方法估计出有效旋转角速度后去除二次项位后的图像聚焦程度，本章引入熵值方法^[58]进行评价，其给定的表达式如下：

$$En = - \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} u_{n_1, n_2} \ln u_{n_1, n_2} \quad (2-28)$$

其中, n_1 是 ISAR 图像行索引号, n_2 是其对应的列索引号, N_1 是距离向单元数目, N_2 是方位向单元数目, 并且利用复图像 I_{n_1, n_2} 得到

$$u_{n_1, n_2} = |I_{n_1, n_2}| / \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} I_{n_1, n_2} \quad (2-29)$$

1) 仿真数据实验

战斗机 MIG-25 数据由 Dr. Victor C. Chen 提供, 其回波数据参数如表 2.3 所示。相邻两幅 ISAR 子孔径图像所对应数据大小 64×64 , 中心时间间隔 0.2731 秒。

表 2.3 仿真数据参数

| 载频 | 带宽 | 步进频数目 | 脉冲重复频率 |
|-------|---------|-------|--------|
| 9 GHz | 512 MHz | 64 | 15 KHz |

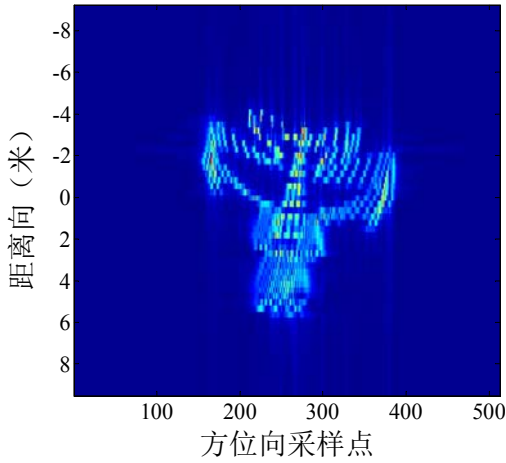


图 2.24 具有距离向和方位向模糊原始图像

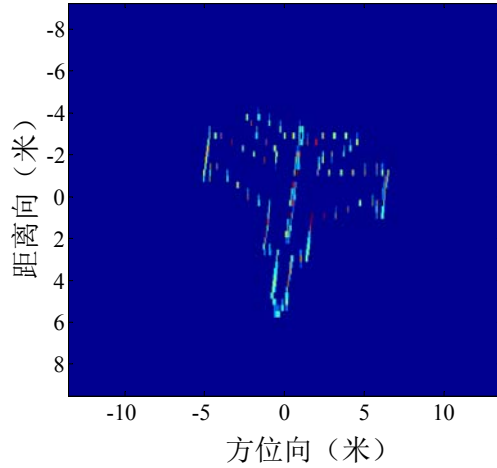


图 2.25 经过本章方法处理后图像

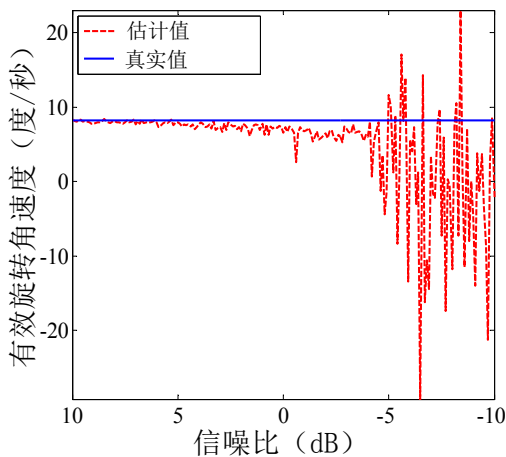


图 2.26 有效旋转角度-信噪比曲线

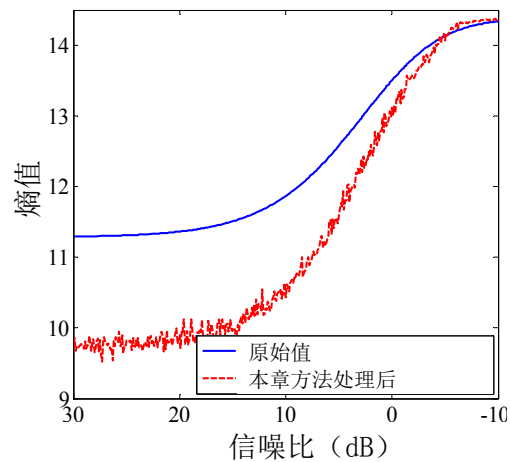


图 2.27 熵-信噪比曲线

在对相邻两幅 ISAR 子孔径图像进行特征点提取中, 由第一步配准得到共 155 个匹配特征点, 在第二步配准后剔除掉 47 个误差较大特征点, 留下 108 个相对准确特征点。在进行 5 次循环搜索后, 得到的旋转角度约为 2.25 度。至此, 通过中

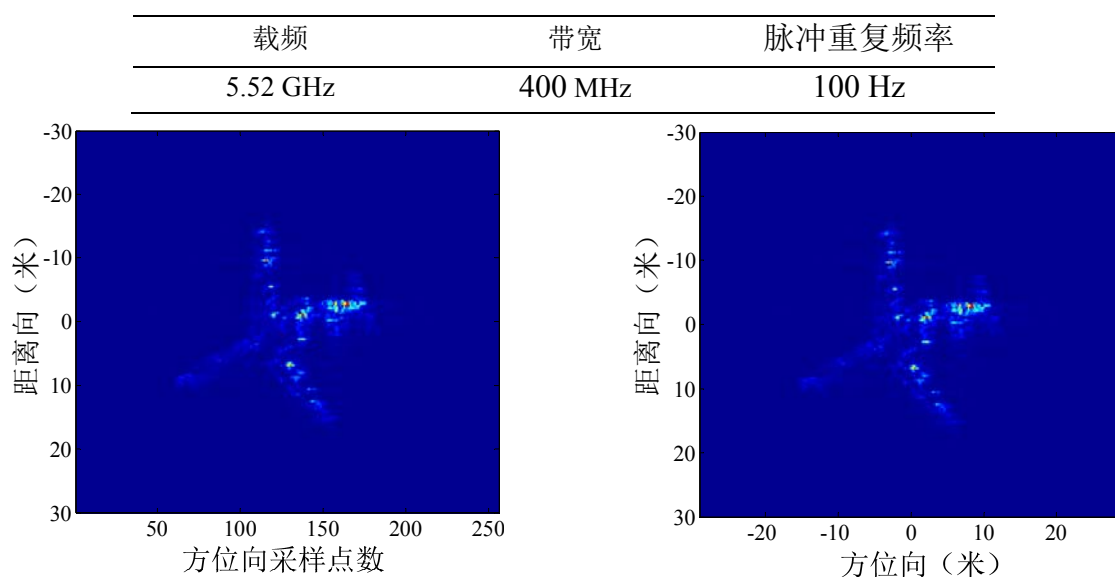
心时间间隔, 得到其相应的有效旋转角速度为 8.1542 度/秒, 该值接近于其真实值 8.25 度/秒。在距离单元方向进行旋转运动补偿后, 得到了聚焦效果明显的目标图像, 如图 2.25 所示。同时, 估计出精度较高的旋转角度可用于方位定标, 得到方位向分辨率为 0.0536 米, 定标方法在本章 2.2 节有详细介绍。对应的熵值从未进行聚焦的 11.2841 下降至聚焦后的 9.5147, 表明了该方法的有效性。

为了使得仿真数据接近于真实场景下的回波数据, 我们在全孔径数据中添加了 -10dB 到 10dB 不同程度高斯噪声。图 2.26 为用本章提出的方法得到的有效旋转角速度估计值, 图 2.27 为所对应熵值曲线。具体地, 在噪声约为 -4.01dB 至 10dB 时, 所估计出的有效旋转角速度精度较高, 尽管在 -4.01dB 后出现剧烈波动。另一方面, 从进行聚焦效果后的图像熵值曲线来看, 在信噪比大于等于 -4.01dB 时, 熵值逐渐变小, 图像聚焦效果比较明显。

2) 实测数据实验

对于实测数据, 我们利用真实 Yak-42 民机。其中该数据在进行本章方法聚焦前, 已经对平动分量进行过补偿。类似地, 我们只需估计出相应有效旋转角速度, 用以消除二次相位。该数据对应回波参数如表 2.4 所示

表 2.4 实测数据参数



从结果上来看, 我们利用大小为 256×64 子孔径数据获取相应子孔径 ISAR 图像, 相邻图像对应中心时间间隔为 0.64 秒, 所提取出的特征点个数为 38 点, 经过配准和剔除错误点后还剩下 30 个较为准确的特征点。经过 5 次旋转角度估计后, 得到旋转角度约为 1.6023 度, 有效旋转角速度为 2.5036 度/秒。因此, 将方位向插值为 512×512 后的方位向分辨率为 0.1215 米, 定标结果如图 2.29 所示。经过聚焦后, 图像熵值从 8.8291 下降至 8.8227。应注意针对本数据的提高效果不是特别明

显，主要是因为在聚焦前已经对数据进行平动补偿，且其本身对应的二次项相位对于散焦影响较小。

2.4 本章小结

本章提出并验证了一种基于特征配准的方位定标算法的高精确性和稳健性。比较与传统的刚体目标定标算法，本文利用 2 维图像域，由精确配准的特征点位置坐标和能量估计转角。同时，利用局部高能量特征点的处理比全局配准更为精确，计算量大大减小。同时，本章提出并验证了一种通过有效旋转角度估计进行 ISAR 目标聚焦的有效性和稳健性。对于图像域有效旋转角度估计而言，其处理计算量对于从信号域进行直接处理要小得多，因为该处理数据只针对少量配准的特征点而非整体像素。尽管该方法是基于短相干处理时间下目标旋转运动视为恒定的前提，但是该方法有利于将短相干处理时间拓展为长相干处理时间。此外，所提出的旋转角度估计方法还可以应用于其他研究方向，比如三维运动目标在长相干时间内的观测等。

第三章 基于运动参数估计和非负矩阵分解的 ISAR 图像融合

3.1 引言

在长相干处理时间段内，逆合成孔径雷达成像技术可以获取不同视角下连续的二维目标图像。为了观测出目标图像中微小的结构，本章主要研究如何利用参数估计对逆合成孔径雷达数据图像进行旋转向量中的旋转角度估计。再通过图像形变校正，获取相似姿态下目标图像。之后，采用非负矩阵分解方法对该序列经过校正后连续图像实行结构上融合，从而在最终图像中观测出单一短相干处理时间内未完全呈现的目标结构。

具体地，利用逆合成孔径雷达成像获取连续短相干处理时间内的目标图像，这些图像主要反映该短相干处理时间内目标特定姿态下的结构。然而，随着二维平面录取的变化，姿态角随着变化，在相应图像中的目标结构也随着变化，导致诸如部分结构丢失、变形等情况，使得所获取的连续图像无法完全反映出目标结构。在现有类似方法中，文献^[59]提出了一种针对逆合成孔径雷达图像中目标融合方法。然而，其忽略了目标在不同观测时间下的平动和旋转分量补偿，即未获取运动参数对目标或者目标图像进行校正和姿态的调整。针对利用图像进行匹配从而达到融合效果，Chen Fulong采用shape矩阵估计的方法^[60]，通过求取特征描述符获取平动分量，然后通过估计的旋转角度和几何不变方法进行图像配准。然而这种基于shape矩阵的旋转角度估计方法主要利用边缘特征点，并不适用于长相干时间的ISAR图像转角估计，并且ISAR目标在长相干时间内运行时其方位向会发生几何形变，该方法未考虑此种情况。针对这个问题，可以提取出高能量点和旋转代价函数进行处理。同时，文献^[52]提出了一种利用RELAX算法获取目标高能量散射点，通过目标旋转运动参数估计，计算出相应散射点匹配矩阵。再利用像素关系校正各个姿态下对应的观测目标图像。然而，该方法在噪声高的情况下，高能量散射点的获取相对困难，并且所使用的匹配矩阵未考虑目标在不同观测时间下的形变，会使得所获取目标图像具有较大误差。

本文提出的方法主要结合不同的基于计算机视觉的目标特征点提取算法Harris^[61]，SURF^[45]，加速分割特征(Features from Accelerated Segment Test, FAST)^[62]和SIFT^[44]，提取ISAR图像不同类型结构特征点。不同方法的结合有利于增加算法的稳定性和可靠性，尤其是目标图像噪声较大或者目标中结构较为稀少时。然后，通过建立特征描述符对提取的特征点进行匹配，删除其错误配准或者配准误差较大的特征点对。之后，利用奇异值分解方法^[63]获取相应旋转角度，进行旋转

运动补偿。再利用搜索方法，估计出目标方位向尺度变化因子，从而进一步进行目标图像几何变形校正。为了更清楚地显示出不同观测时间下全部目标结构，本章采用非负矩阵分解方法^[64-65]提取所有经过姿态校正后图像中的不同结构，构建出类似结构库的结构原型图。同时，该方法对于不同姿态下图像的能量阶影响具有良好的克服能力，避免了部分图像全局能量过高或过低导致模糊。

3.2 序列 ISAR 图像融合算法

3.2.1 基于运动参数估计的 ISAR 图像校正

本方法利用平均特征坐标和奇异值分解方法获取运动参数。具体地，我们先从序列图像中提取特征点并进行配准用以计算特征中心，之后估计出其方位向尺度，并计算对应的旋转角度。

步骤一：对于两幅连续ISAR图像 I_1 和 I_2 ，首先提取出四种不同类型Harris，SURF，FAST和SIFT的特征点信息。之后，获取其相应的特征描述符算子，利用第二章的配准方法进行特征点配准和错误适配点的剔除。但是，该方法依赖于一个足够大的特征点数据库，即要求所获取的正确配准特征点数目足够多。因此，将上述四种方法得到的特征点进行合并，得到X-Y坐标下有效特征坐标向量为

$$\mathbf{C} = \{\mathbf{C}_{\text{harris}}, \mathbf{C}_{\text{surf}}, \mathbf{C}_{\text{fast}}, \mathbf{C}_{\text{sift}}\} \quad (3-1)$$

步骤二：基于如上有效特征坐标向量 \mathbf{C} ， I_1 和 I_2 之间旋转角度即可求出。尽管旋转角度的估计需要预先得到旋转中心，但是严格按照目标运动的旋转中心在实际处理中难以实现，尤其是物体非自身旋转，而是围绕某外在物体进行旋转情况。因此，本章采用基于图像的近似旋转中心，其可能与实际真实轨道旋转中心相差较大，但是对于短相干处理时间内图像之间的处理，该旋转中心的确定方式仍能够获取较精确的结果。假设 \mathbf{C} 有 K 对有效特征点，则其特征点位置坐标按照旋转中心补偿后为

$$[\dot{x}_k^\eta, \dot{y}_k^\eta] = [x_k^\eta, y_k^\eta] - [\bar{x}^\eta, \bar{y}^\eta], k = 1, \dots, K \quad (3-2)$$

其中， $[x, y]$ 是 X 和 Y 轴下的坐标值，ISAR 图像的索引号 $\eta = 1, 2$ ($\eta = 1$ 为第一幅图像 I_1 ， $\eta = 2$ 为第二幅图像 I_2)， $[\bar{x}, \bar{y}]$ 是特征中心。应注意到在数据录取平面下旋转角速度存在不断变换，这将导致图像变形，特别是在方位向上。因此，针对方位向 ISAR 图像校正尤为重要，本章主要利用简单搜索方法。假定一个方位向尺度因子是 s ，对应修正后第二幅图像特征坐标为

$$[x_k'^2, y_k'^2] = [\dot{x}_k^2, \dot{y}_k^2] \cdot \begin{bmatrix} 1/s & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, k = 1, \dots, K \quad (3-3)$$

之后，将 $[\dot{x}^1, \dot{y}^1]$ 和 $[x'^2, y'^2]$ 用于奇异值分解中估算其旋转角度。然后，对第二幅图像 \hat{I}_2 采用逆旋转补偿，得到

$$\tilde{\mathbf{I}}_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \hat{\mathbf{I}}_2 \quad (3-4)$$

求取图像 \mathbf{I}_1 和 $\tilde{\mathbf{I}}_2$ 平均值得到新均值图像为 $\mathbf{I}_{1,2}$ ，其对应的熵值作为方位向尺度在搜索方式中的评价准则。最后，最小熵值对应的均值图像即为经过尺度校正和自聚焦后的最佳图像。步骤一和步骤二作为两幅相邻 ISAR 图像的一个模块，我们需要将这个模块应用到其他相邻 ISAR 图像中，其流程图如图 3.1 所示

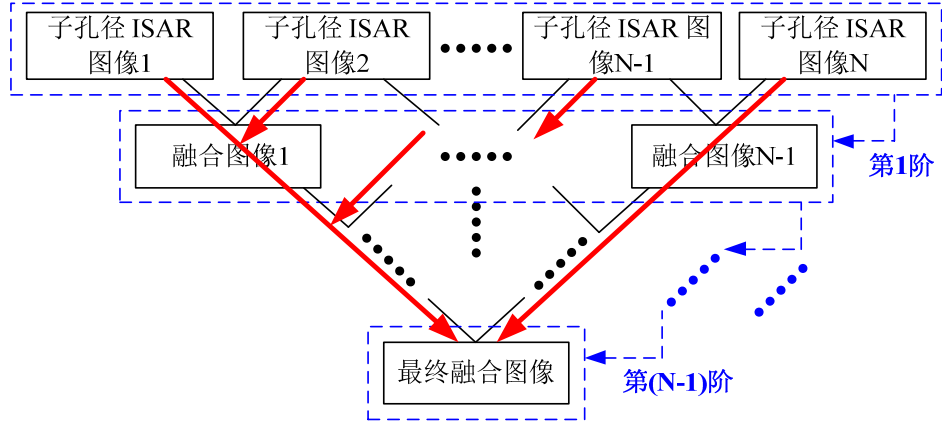


图3.1 融合方法流程图

在每一个模块中，修正后图像在经过方位向角度和特征坐标中心补偿后，利用非负矩阵分解方法获取对应基图像，即避免不同子图像带来不同能量阶的影响，同时又包含所有子图像中具有的目标结构。首先利用公式(3-2)进行中心补偿，用公式(3-3)进行方位向尺度校正。之后，按照公式(3-4)进行逆旋转补偿。各个模块所获取的参数不同将影响到下一阶的处理结果，图 3.1 中用红色粗体流线表示参数应用关系。最后，我们获取 N 幅校正后包含相似成像角度的 ISAR 图像。

3.2.2 基于非负矩阵分解方式的 ISAR 图像融合

传统的用于融合上述校正后 ISAR 图像的方法主要是均值法，该方法在两幅图像具有相同或者差异不大的能量阶的情况下具有良好的融合效果，但是由于一般的 ISAR 子图像在目标运动中会受到诸如噪声、雷达视线角度变化等方面的影响，得到的图像能量阶会发生一定变化，尤其是对于观测时间较长的连续图像，该影响更为显著。为了克服这一困难，我们引入非负矩阵分解方法^[64]获取较为平衡的能量阶图像。具体地，我们假定一个 $N \times M$ 维的图像向量为 \mathbf{V} ，其由如下两部分非负矩阵组成

$$\mathbf{V} = \mathbf{L}\mathbf{H} \quad (3-5)$$

其中， \mathbf{L} 为 $N \times \mathfrak{R}$ 维的非负矩阵， \mathbf{H} 为 $\mathfrak{R} \times M$ 维的非负矩阵，至此非负矩阵分解方法可视为获取更小维度矩阵的优化求解方法。因此，我们利用如下

Kullback-Leibl^[65]作为代价函数

$$D_{KL}(V\|LH) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left[v_{ij} \log \frac{v_{ij}}{(LH)_{ij}} - v_{ij} + (LH)_{ij} \right] \quad (3-6)$$

其中, V , L 和 H 中的元素分别定义为 v , l 和 h 。在每一次迭代中, 公式(3-6) 对应最小值按照如下迭代公式更新

$$l_{ir} \leftarrow l_{ir} \sum_{j=1}^M \left[h_{rj} v_{ij} / (LH)_{ij} \right] / \sum_{u=1}^M h_{ru} \quad (3-7)$$

$$h_{rj} \leftarrow h_{rj} \sum_{i=1}^N \left[l_{ir} v_{ij} / (LH)_{ij} \right] / \sum_{t=1}^N l_{tr} \quad (3-8)$$

最终, 我们获取的融合图像 L 与原始 I_1 和 I_2 图像具有相同大小, 并且具有两幅子图像中结构的并集。

3.3 仿真结果分析

本实验主要由三个实验组成, 第一个实验用以验证方位向尺度搜索方法进行图像几何校正的有效性, 主要通过熵值搜索出具有最佳聚焦性能的方位向旋转角速度变化值。第二个实验描述了仿真实验中对于不同旋转角速度和丢失结构的重构问题。第三个实验利用公开的 ISAR 数据验证本章方法, 其聚焦效果和融合效果较为明显。

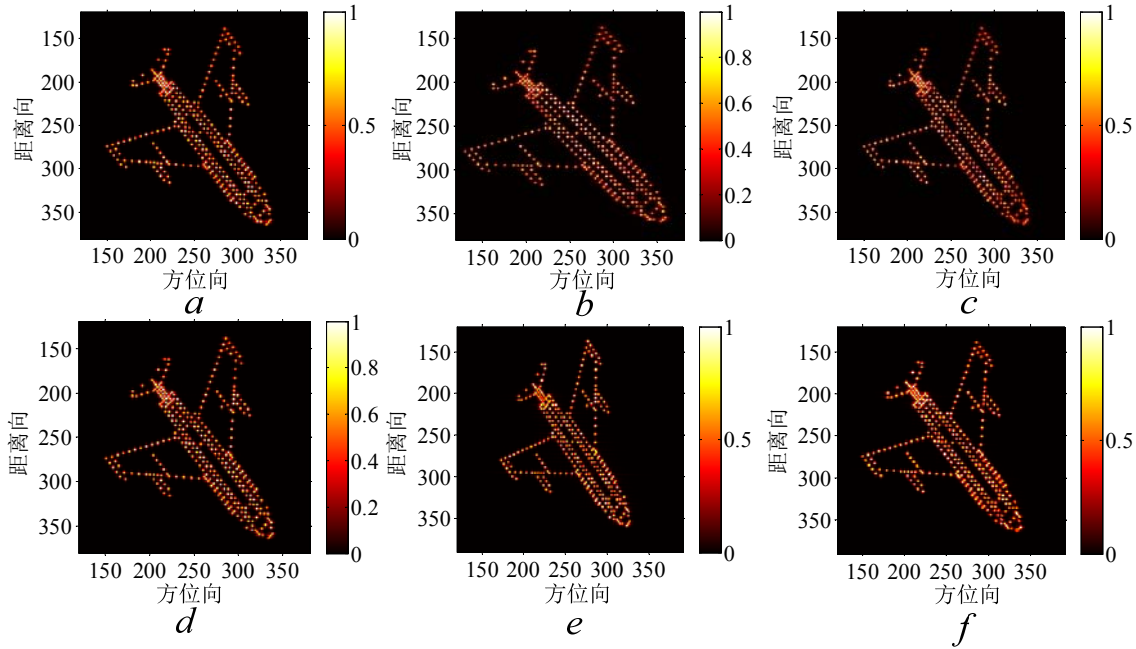


图 3.2 方位向上进行形变校正结果 a,b. 两幅连续 ISAR 图像(具有 2.1522 度旋转角度且旋转角速度从 1 到 1.2 度/秒) c. 图 a,b 融合后的结果 d,e. 两幅连续 ISAR 图像(具有 2.8487 度旋转角度且旋转角速度从 1 到 0.8 度/秒) f. 图 d,e 融合后的结果

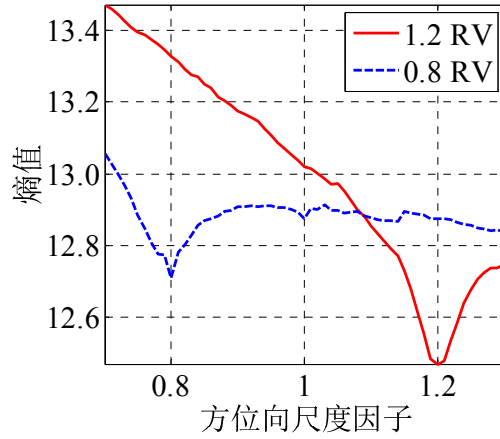


图 3.3 对应于图 3.2 的方位向尺度搜索熵值曲线

本实验用于验证目标图像在方位向上目标结构校正效果。由于旋转角速度由 1 度/秒增加为 1.2 度/秒，其对应的方位向尺度变大，可比较图 3.2b 与图 3.2a。在这种情况下，如果未对其进行方位向尺度校正而直接进行融合会导致模糊和错误。因此，利用常用的搜索方法得到最终方位向尺度因子 1.2，如图 3.3 所示的红色实体熵值曲线。之后，调整图 3.2b 并估计出其旋转角度为 2.1522 度。图 3.2c 可见，融合后目标结构可以完全与未变形和旋转的结构重合上。类似地，对于从 1 度/秒下降至 0.8 度/秒的旋转角速度对应的 ISAR 序列图像，相应的实验结果如图 3.2 的第二行所示。具体地，通过有效配准的特征点计算出其旋转中心，搜索出其对应的方位向尺度变换因子 0.8(由图 3.3 中蓝色虚线所示)，之后修正其对应坐标用以估算旋转角度。最后，通过调整图 3.2e，利用非负矩阵分解方法将其与图 3.2d 进行融合，得到图 3.2f。

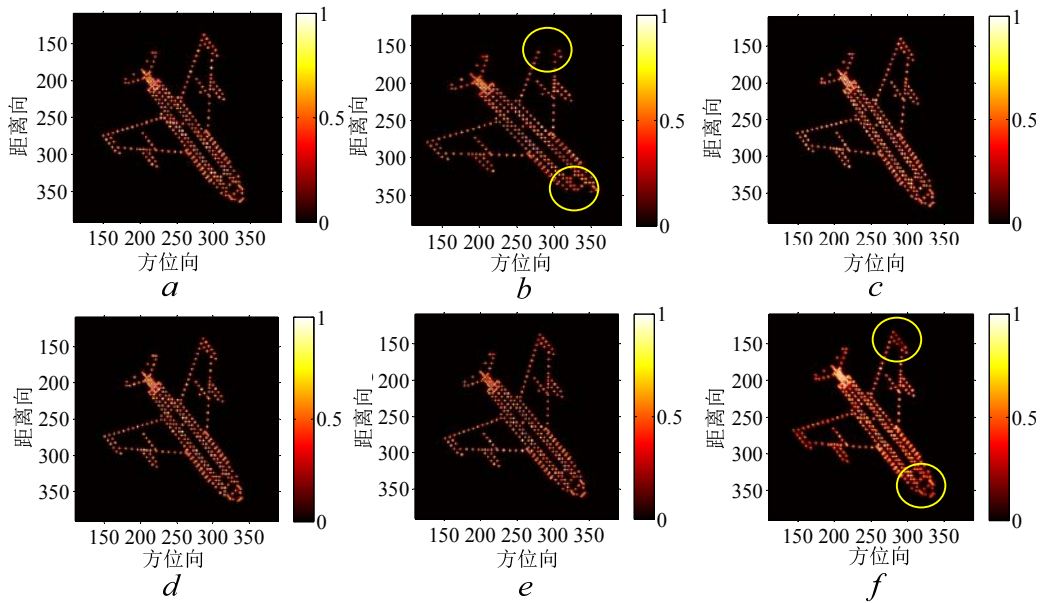


图 3.4 5 幅连续的 ISAR 图像 a-e. 5 幅原始未校正的连续图像(其存在局部结构缺失和方位向形变) f. 融合结果

由于 ISAR 图像中目标局部结构通常会随着不同短相干处理时间内雷达视线的改变而改变, 导致结构在图像中的突然出现或者消失。因此, 利用长相干处理时间内的原始子图像进行融合对研究长合成孔径下的目标结构极为重要。在本实验中, 我们人为地去除掉目标飞机中机翼和机头的部分结构, 如图 3.4b 所示。应注意到前两幅 ISAR 图像具有不同旋转角速度。同时, 其他 ISAR 图像保持相同旋转角速度。每两幅相邻 ISAR 图像具有一定的姿态角旋转。在图 3.4f 中, 缺失的结构被重构并且其聚焦效果良好。

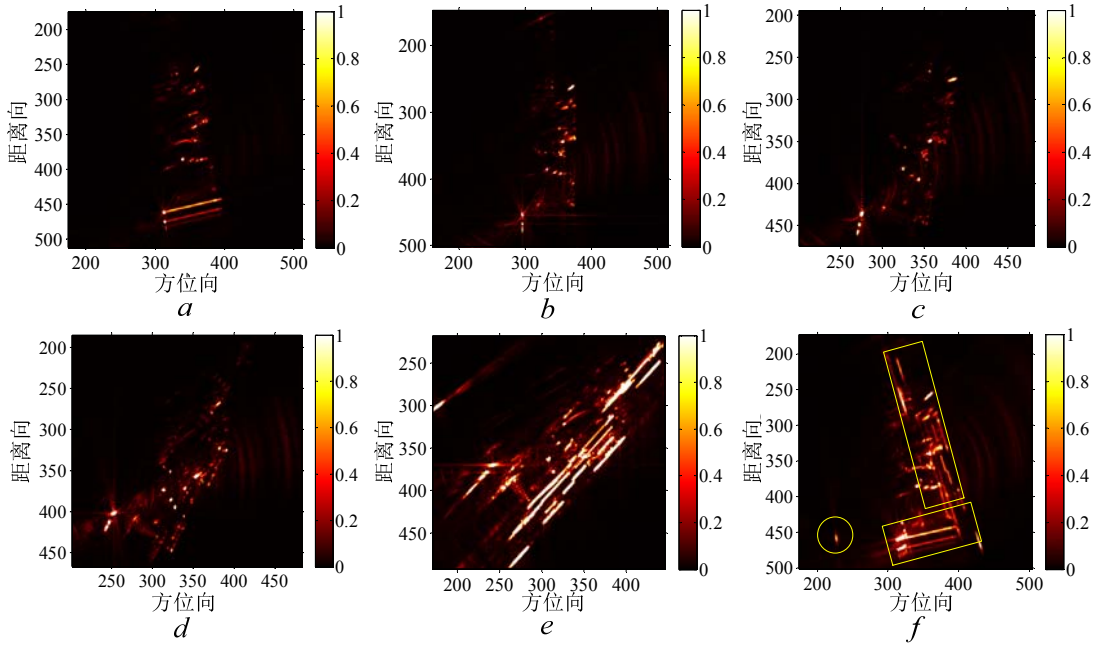


图 3.5 5 幅挑选出的 ISAR 图像 a-e. 5 幅原始未校正的连续图像(其存在局部结构缺失和方位向形变) f. 融合结果

为充分证明本章算法可行性, 我们利用公开发表的 backhoe 铲土机数据。该数据在不同姿态角度下局部结构差异较为明显, 通过融合能够很好地将长观测时间下的各个局部结构显示在一幅 ISAR 图像中。具体地, 所估计出的特征中心为 [337,337]。同时, 估算出的方位向尺度变换因子约为 1, 相邻两两图像之间旋转角度约为 5 度。在融合后的图 3.5f 中可以看出, 由圆圈标记的结构在前几幅图像中并未出现, 而在后几幅图像中才出现。类似地, 由方框标记的结构在后几幅图像中并未出现, 而在前几幅图像才出现。经过融合, 铲土机在不同姿态下的横纵向结构都能够在一幅 ISAR 图像中显示, 所观测的连续角度约为 60 度。

3.4 本章小结

本章提出的利用连续 ISAR 图像进行目标结构的融合, 通过运动参数估计和非负矩阵分解方法获取序列图像的基图像, 用以反映出目标在长观测时间下不同结

构的集合。实现本方法的思路如下：首先对长相干时间的ISAR全孔径数据分解成短孔径数据进行成像处理得到连续ISAR图像；再提取出ISAR图像中稳定的特征点用于有效匹配，将这些有效匹配后的点进行转角估计，由此得到高精度的转角；之后通过方位尺度搜索方法，结合图像熵值确定出方位向尺度因子，并用其校正ISAR图像的方位向尺度。然后，采用非负矩阵分解提取出最初ISAR图像和经过后处理后相邻ISAR图像基图像，从而获取最终准确有效ISAR目标融合结果图。上述的综合实验验证了该算法在参数估计、方位向尺度校正和最终图像融合后的有效性和稳健性。

第四章 基于图像特征和高斯概率的空间目标部件检测

4.1 引言

逆合成孔径雷达成像技术是实现卫星目标测量和分析的有效手段, 高分辨 ISAR 成像可对卫星几何形态精确描述, 实现对其载荷状态分析和判断。比如, 德国跟踪与成像雷达(Tracking and Imaging Radar, TIRA)系统分别利用 L 波段信号和 Ku 波段信号获取航天目标数据, 通过高分辨率距离方位成像研究航天目标(如 ABRIXAS、Mir Space Station)的散射特性和结构损坏分析^[66]; 美国航空局 NASA 利用轨道残骸雷达校正系统(Orbit Debris Radar Correction System, ODRCS)实验, 通过 Haystack 雷达模拟地球轨道中残骸部件观测与形态研究^[67]。但目前, 利用 ISAR 图像实现对目标载荷等兴趣部件检测的公开发表研究很少。

在航天目标运行轨道中, 通常需要在短时间内对目标运行姿态进行监测, 从而对偏离轨道的目标及时调整。通常, 利用特定姿态下目标部件与相同姿态下航天目标进行部件匹配。我们考虑将高精度遥感图像中区域检测方式运用到 ISAR 图像部件检测上。在现有研究方法中, 对全局高精度遥感图像进行目标检测较为全面^[68-73]。具体地, 一般先从全局图像中利用人工选择或者边缘检测^[69-70]方式找到需要进行建筑物检测区域; 然后利用特征点的提取方式得到对应特征的物理散射点信息; 之后, 利用判决方法, 诸如概率框架方法^[71]、空间投票方法^[72]、恒虚警处理技术^[73]等确定检测结果。然而, 这类方法均利用高分辨率、场景对比度信息丰富的卫星遥感图像, 有利于检测出大量稳定有效特征点用于后续匹配。

Cem Unsalan 等提出一种基于高质量卫星图像人工构建物和街道检测方式^[74]。这种方法利用大量有效特征点确定检测目标的最优特征点, 能够有效地对人造目标进行特征点匹配, 最后精确地检测出相应目标。但是, 这种方法所使用卫星图像具有很高分辨率且提取的特征点信息与周围点信息对比度明显, 它在一定程度上类似于光学图像, 是一种利用视觉效果原理获取的比较直观的图像。但是, 对于一般情况下相对模糊且对比度不高的 ISAR 图像而言, 如果直接用上述方式对图像进行机动目标部件检测, 容易造成因提取特征点性能不佳而导致检测失败。陶超等人利用一种均值移动分割方法, 其结合 Gabor 纹理特征方法^[75]。该方法首先对图像进行区域分割, 之后对每个分割区域采用 Gabor 纹理特征进行聚类形成视觉词汇, 最后通过区域分析找出其所属归类。这种方法能够有效地通过图像分割方法, 确定出相关研究区域后, 再利用遥感影像中纹理特征找出所需研究的目标, 从而实现目标检测。但是, 这种方法要求用于检测的图像具有对比度较高的边缘

信息用于纹理特征提取，而对于复杂运动 ISAR 机动目标而言，不同方位向视角下的成像结果差别很大，同一个部件目标在很小姿态角度变化下也会产生较大边缘信息区别。这种情况会造成由于部件重叠、缺失导致的边缘混叠而使得最终部件检测失败。

相比之下，ISAR 图像所具有的场景信息并不多，甚至很少，以上方法并不完全适用。故本文提出一种针对 ISAR 图像目标部件检测方法。该方法通过区域特征匹配方式，对航天目标中具有与测试部件相似姿态的目标部件进行匹配。本文将如下四个组成部分进行说明：

- 1) 利用尺度不变特征变换和快速鲁棒特征点分别对预处理得到的航天目标和目标部件的 ISAR 图像提取特征信息；
- 2) 利用特定类型的特征点确定特征窗口及其定位方式；
- 3) 在特征窗口中，利用欧氏距离准则进行区域特征匹配；
- 4) 计算出每次区域特征匹配的累积检测率，将最大累积检测率和对应的平均检测率作为最终部件检测的衡量标准，并以该次区域特征匹配结果作为最佳部件检测结果。

4.2 空间目标部件检测算法

4.2.1 基于区域特征的图像特征点选择

1) 特征提取

针对航天目标和目标部件 ISAR 回波数据，本章利用传统 ISAR 成像技术处理，得到航天目标和目标部件图像。由于一般航天目标的结构难以确定，对应的特征点存在不同类型，故本文结合两种典型的具有不同类型特征点的 SIFT 和 SURF 对航天目标和目标部件 ISAR 图像分别进行特征提取。由 SIFT 提取的特征多为能够反映目标几何特征的角点、高能量点等，用于后续特征窗口设计；由 SURF 获得具有高梯度变化特性散射点对应下特征点。至此，得到由特征点的位置坐标 $[x, y]$ 、特征方向 $\theta(x, y)$ 和特征权值 $w(x, y)$ 构成的特征向量 $\mathbf{V} = [x, y, \theta, w]$ 以及 128 维特征描述符 \mathbf{D} 。其中，特征权值 $w(x, y)$ 取决于特征点能量幅度值。

假定利用 SIFT 在航天目标 ISAR 图像提取出 M_1 个特征点，得到航天目标特征向量 $[x_i^T, y_i^T, \theta_i^T, w_i^T], i = 1, \dots, M_1$ 和 $M_1 \times 128$ (行 \times 列) 特征描述符 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^T$ ；利用 SURF 提取出 M_2 个特征点，得到航天目标特征向量 $\mathbf{V}_{\text{SURF}}^T = [x_j^T, y_j^T, \theta_j^T, w_j^T], j = 1, \dots, M_2$ 和 $M_2 \times 128$ 特征描述符 $\mathbf{D}_{\text{SURF}}^T$ 。类似地，利用 SIFT 和 SURF 分别从目标部件 ISAR 图像提取出 N_1 和 N_2 个特征点，得到 $\mathbf{V}_{\text{SIFT}}^C = [x_u^C, y_u^C, \theta_u^C, w_u^C], u = 1, \dots, N_1$ ， $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^C$ ， $\mathbf{V}_{\text{SURF}}^C = [x_v^C, y_v^C, \theta_v^C, w_v^C], v = 1, \dots, N_2$ 和 $\mathbf{D}_{\text{SURF}}^C$ 。

2) 特征窗口及其定位方式

由于全局特征检测方式容易引入不同姿态下部件错误检测，我们需要利用区域特征匹配方式避免同类型特征点干扰。由于 SIFT 特征点可较好地反映出部件几何结构，我们利用 $\mathbf{V}_{\text{SIFT}}^C$ 设计区域特征匹配的特征窗口。该特征窗口利用区域限定原则将航天目标和目标部件 ISAR 图像特征点选择性筛选，将包含在窗口中的航天目标特征点与部件目标特征点进行匹配。假定 SIFT 特征点位置坐标向量表示为 $\mathbf{X} = [x_u^C, y_u^C], u = 1, \dots, N_1$ ，则特征窗口长和宽对应为

$$W_L = \max(x_u^C) - \min(x_u^C) \quad (4-1)$$

$$W_H = \max(y_u^C) - \min(y_u^C) \quad (4-2)$$

至此，我们还需确定用于特征窗口移动的定位路径。为减小算法复杂度，我们利用航天目标 ISAR 图像中提取的特征点作为窗口定位点，这些点构成的路径即为定位路径。通过该路径，特征窗口在航天目标 ISAR 图像中移动，将每次特征窗口所包含的航天目标特征点与目标部件特征点进行如下粗匹配。

3) 基于特征窗口的粗匹配

假定特征窗口在航天目标 ISAR 图像中第 $r(r = 1, \dots, M_1 + M_2)$ 个特征点定位，其包含 $K_1 + K_2$ 个航天目标特征点(其中 K_1 为 SIFT 类型特征点， K_2 为 SURF 类型特征点)和 $L_1 + L_2$ 个目标部件特征点(其中 L_1 为 SIFT 类型特征点， L_2 为 SURF 类型特征点)。由此，获得 $K_1 \times 128$ 的 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^T$ ， $K_2 \times 128$ 的 $\mathbf{D}_{\text{SURF}}^T$ ， $L_1 \times 128$ 的 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^C$ 和 $L_2 \times 128$ 的 $\mathbf{D}_{\text{SURF}}^C$ 。之后，分别对 SIFT 和 SURF 两种类型特征点进行粗匹配。

$$\|\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^T - \mathbf{D}_{\text{SIFT}}^C\| = \begin{bmatrix} E_{1,1}, & \cdots, & E_{1,L_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{K_1,1}, & \cdots, & E_{K_1,L_1} \end{bmatrix} \xrightarrow{\Gamma'} \begin{bmatrix} \hat{E}_1 \\ \vdots \\ \hat{E}_{K_1} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

在经验阈值 $F=0.95$ 下，最佳欧氏距离 \hat{E}_i 的映射准则 Γ' 为：

$$\hat{E}_k = \min[E_{k,l}] < F, k = 1, \dots, K_1, l = 1, \dots, L_1 \quad (4-4)$$

其中，两个特征点之间匹配的整体差值 $E_{k,l}$ 为 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^T$ 第 k 行和 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^C$ 第 l 行的欧氏距离和，其表达式为

$$E_{i,j} = \sqrt{\sum_{\varepsilon=1}^{128} [e_k^T(\varepsilon) - e_l^C(\varepsilon)]^2} \quad (4-5)$$

其中， $e_k^T(\varepsilon)$ 表示 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^T$ 第 k 行中第 ε 个数据；类似地， $e_l^C(\varepsilon)$ 表示 $\mathbf{D}_{\text{SIFT}}^C$ 第 l 行中第 ε 个数据。同时，对 $\mathbf{D}_{\text{SURF}}^T$ 和 $\mathbf{D}_{\text{SURF}}^C$ 进行(4-3)计算。利用式(4-5)，我们将满足条件(4-4)的欧氏距离作为最佳欧氏距离，完成航天目标 ISAR 图像在该特征窗口第 k 个特征点与复杂目标结构部件在该特征窗口第 l 个特征点粗配准。随着特征窗口沿航天目标 ISAR 图像特征点移动，每次移动进行一次粗匹配，最终将完成 $(M_1 + M_2)$ 次粗匹配。对于每次粗匹配，我们仍需进一步对错误匹配特征点进行剔除，故引

入如下加权高斯检测率计算准则。

4.2.2 基于高斯概率的检测度分析

由于 ISAR 图像中航天目标与目标部件存在旋转分量, 同一散射点在不同时刻有位置差异, 而粗匹配仍有错误匹配特征点。传统解决方法利用最小均方误差选出与均值数据最接近数据, 或者采用随机采样一致性选出分布密集的数据。但是这两种方法都必须建立在大量测试数据(即本文中的欧氏距离分量), 否则会造成错误。因此, 我们提出一种基于加权高斯概率的算法, 对特征点数目少的区域特征匹配结果进行优化。假定上述第 r 次粗匹配中, 有 P 对粗匹配特征点, 我们引入加权高斯检测率计算函数

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sigma_p^2 C} \times \exp \left[-\frac{(\hat{x}_p^T - \hat{x}_p^C)^2 + (\hat{y}_p^T - \hat{y}_p^C)^2}{2\sigma_p^2} \right], p = 1, \dots, P \quad (4-6)$$

其中, 加权坐标为 $\hat{x}_p^T = x_p^T + 0.5\sigma_p^T \sin \theta_p^T$, $\hat{y}_p^T = y_p^T + 0.5\sigma_p^T \cos \theta_p^T$, $\hat{x}_p^C = x_p^C + 0.5\sigma_p^C \sin \theta_p^C$, $\hat{y}_p^C = y_p^C + 0.5\sigma_p^C \cos \theta_p^C$, 平均能量幅度 $\sigma_p = 0.5(\sigma_p^T + \sigma_p^C)$ 。加权目的在于利用同一特征点在小转角内具有相似相对位置坐标、特征点方向和能量值, 将不同 ISAR 图像同一散射点进行匹配。通过(4-6), 按照如下经验公式筛选有效匹配的特征点。

$$\tilde{f}_z = \{f_p | f_p \geq 0.6 \max[f_p]\}, z = 1, \dots, Z \quad (4-7)$$

之后, 将满足上式的 Z 个特征点作为有效匹配特征点, 利用下式计算出本次区域特征匹配累积检测率

$$Ra = \sum_{z=1}^Z \tilde{f}_z \quad (4-8)$$

在 $M_1 + M_2$ 次区域特征匹配后, 得到 $M_1 + M_2$ 个 Ra 。利用区域特征匹配的正确匹配特征点数目越多对应的累积检测率越大原则, 其对应平均检测率为 $\tilde{R} = Ra / Z$ 。应注意, 本章中检测率包含累积检测率和平均检测率。

4.2.3 算法流程图和复杂度分析

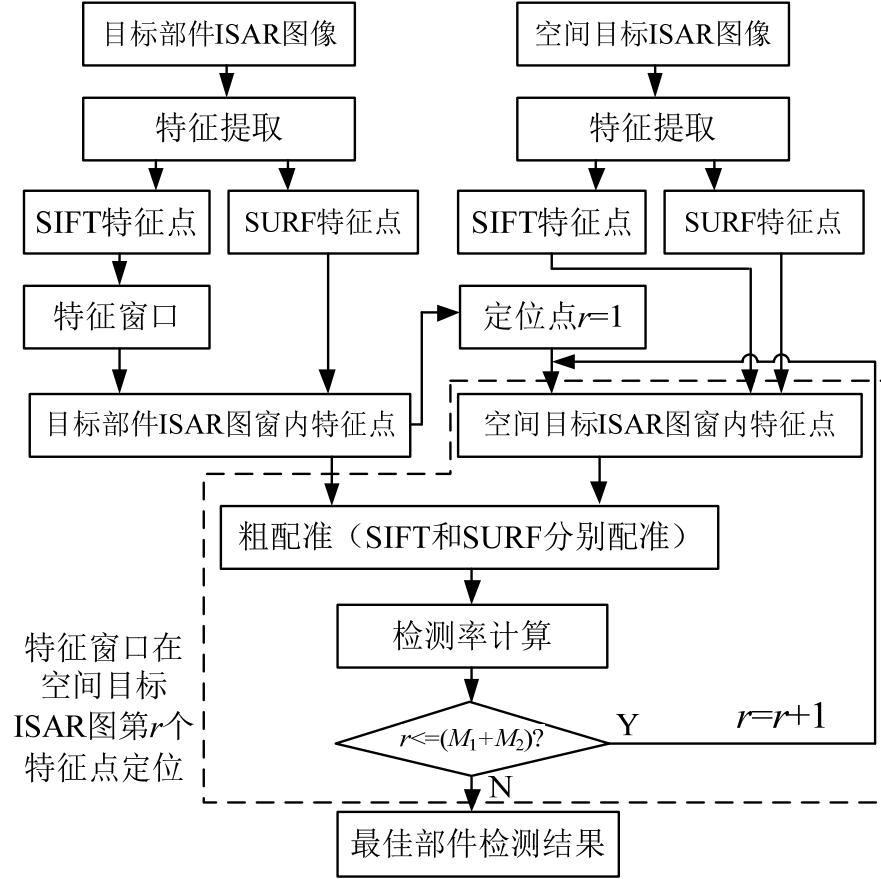


图 4.1 部件检测算法流程图

假定子孔径数据预处理和特征提取所需复杂度分别为 Θ_1 和 Θ_2 。利用 N_1 个目标部件 SIFT 特征点得到特征窗口的复杂度为 $\Theta_3 = 4N_1 + 2$ 。在第 r 次特征窗口定位中, 进行 SIFT 类型粗匹配需 $(128 \times 2 + 2)K_1L_1 + K_1$; 同理进行 SURF 类型粗匹配需 $(128 \times 2 + 2)K_2L_2 + K_2$, 则粗匹配需 $\Theta_4 = 258(K_2L_2 + K_2L_2) + K_1 + K_2$ 。利用式(4-5)~(4-7)计算检测率需 $\Theta_5 = 30P + S + 2$ 。因此, 第 r 次区域特征匹配需 $\Theta_r = \Theta_4 + \Theta_5 \approx O(n^2)$ 。对于全部 $M_1 + M_2$ 次特征区域匹配, 由于每次窗口所含特征点数变化, 故本章算法复杂度近似为 $\Theta \approx \Theta_1 + \Theta_2 + \Theta_3 + (M_1 + M_2)(\Theta_r + 1) \approx \Theta_1 + \Theta_2 + O(n^3)$, 其算法复杂度数量级同时取决于提取特征点数目。相比于全局特征检测和整体图像方法, 本章方法采用局部稳健散射点作特征点, 计算量大大减少。

4.3 仿真结果分析

本实验采用三维空间电磁结构进行算法验证。该类模型为带有卫星舱体和两个不同姿态太阳能电池板(以下简称“电池板”)的卫星模型、特定姿态下卫星舱体和卫星太阳能电池板。算法运行平台为 Windows XP 系统 Intel Core CPU E4500 的 MATLAB R2010a。系统仿真参数如下表 4.1 所示, 其中 ISAR 图像大小利用 8 倍

零插值算法统一图像大小，并将像素变为 0.125 亚像素级。

表 4.1 系统仿真参数

| 检测目标 | 子数据大小 | 图像大小 | 载频 | 带宽 | 步进角度 | 脉冲重复频率 |
|--------|-------|---------|--------|-------|---------|--------|
| 舱体、电池板 | 64×64 | 512×512 | 10 GHz | 1 GHz | 0.1 deg | 100 Hz |

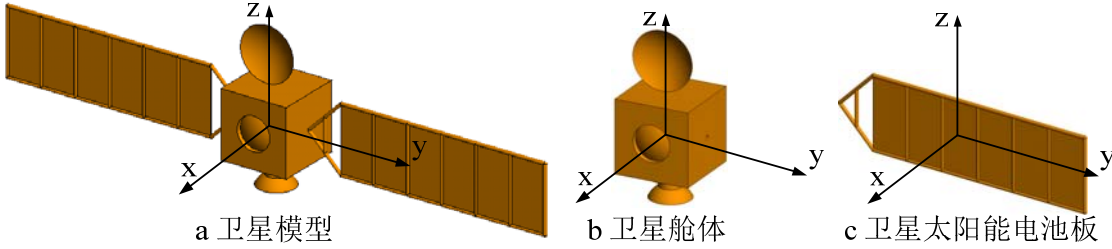


图 4.2 三维仿真模型

4.3.1 利用三维卫星模型分别检测舱体和电池板

本实验利用三维卫星模型(图 4.2a)分别与卫星舱体(图 4.2b)和电池板(图 4.2c)进行部件检测，并确定部件检测率。特征提取结果如图 4.3 所示，其中第一行为 SIFT 特征点，第二行为 SURF 特征点。

结合图 4.3a 共 218 个卫星模型特征点，完成 218 次区域特征匹配，并分别计算检测率，如图 4.4 所示。在舱体检测中，由图 4.3b(1)得到 $44 \times 21 (W_L \times W_H)$ 特征窗。从图 4.4a 和图 4.4b 可以看出，最大累积检测率为 7.8231，对应特征窗口索引号分别为 100 和 101，如下所示

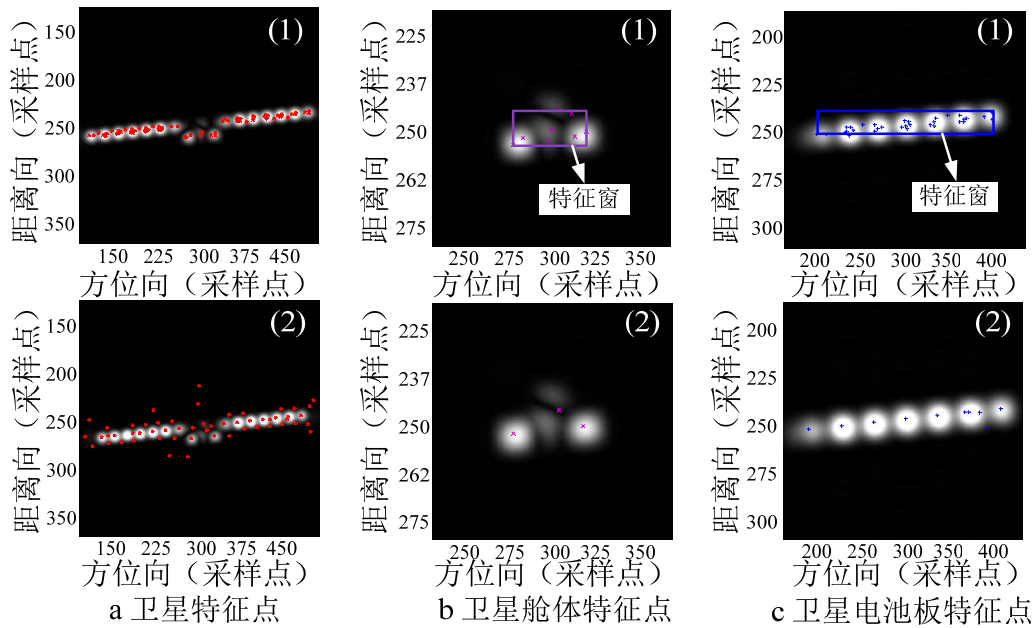


图 4.3 基于 SIFT 和 SURF 的特征点

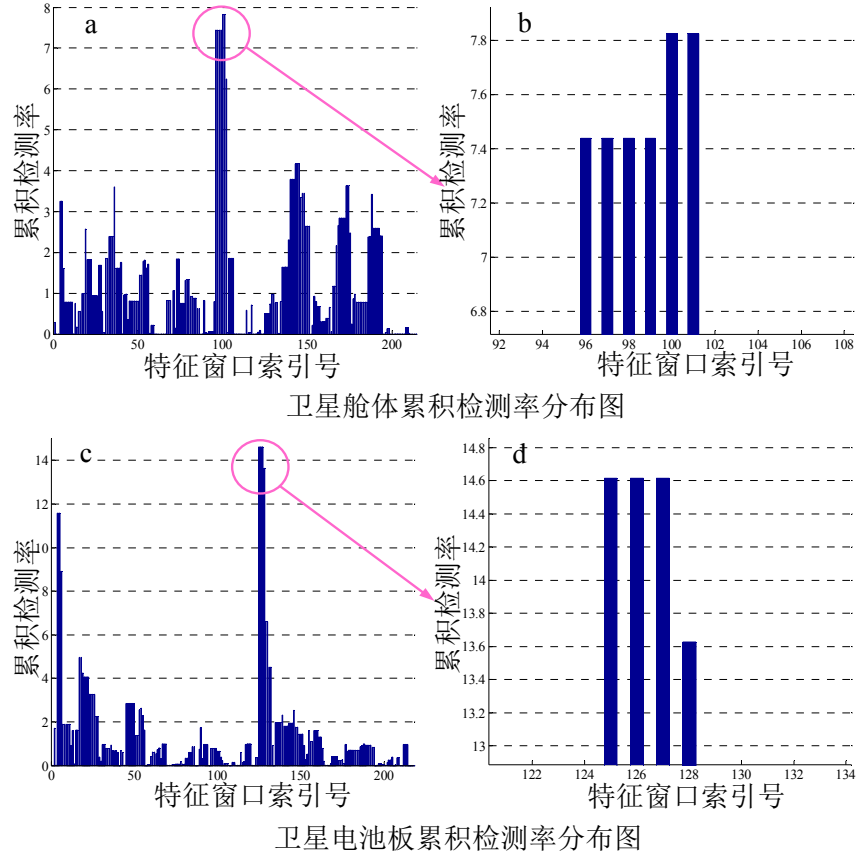


图 4.4 累积检测率分布图

结合图 4.3a 共 218 个卫星模型特征点，完成 218 次区域特征匹配，并分别计算检测率，如图 4.4 所示。在舱体检测中，由图 4.3b(1)得到 $44 \times 21 (W_L \times W_H)$ 特征窗。从图 4.4a 和图 4.4b 可以看出，最大检测率为 7.8231，对应特征窗口索引号分别为 100 和 101，如图 4.4b 局布放大图所示。这是由于两次检测特征窗口定位点相邻较近，使其包含相同特征点。最终部件检测结果为如图 4.9b。类似地，在电池板检测中得到 $130 \times 17 (W_L \times W_H)$ 特征窗。图 4.4c 和图 4.4d 中最大累积检测率为 14.6137，特征窗口索引号分别为 125、126 和 127，检测结果如图 4.9d 所示。

从图 4.9a 和图 4.9c 可以看出，用传统全局特征检测方法进行航天目标部件检测会出现错误，因为卫星特征点数目远多于部件特征点数目，在全局匹配中会出现相似或者相同的局部特征，导致部件中部分特征点与卫星部分特征点发生干扰造成错误匹配。而利用本章检测方法，则能够有效避免这种情况，如图 4.9b 和图 4.9d 所示。特别地，在侦查特定时刻下运动目标，如果目标具有多个结构相同但姿态不同的部件，要检测出其中一个特定姿态部件，全局特征检测方式难以做到正确检测，而本章方法可以准确进行检测，例如图 4.9c 和图 4.9d 中两个相同结构但不同姿态电池板检测。算法所对应时间如表 4.2，其反映本方法具有短时性。

表 4.2 分步算法用时(单位: 秒)

| 检测目标 | 预处理 ¹ | SIFT 提取 | SURF 提取 | 区域特征匹配 | 检测率计算 |
|------|------------------|---------|---------|--------|--------|
| 舱体 | 0.3830 | 9.9035 | 2.9484 | 1.2439 | 0.3232 |
| 电池板 | 0.3950 | 10.0452 | 2.9033 | 3.1524 | 0.2982 |

4.3.2 不同旋转角度下的目标检测

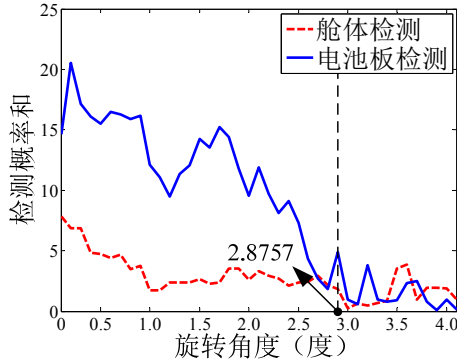


图 4.5 累积检测率-旋转角度曲线图

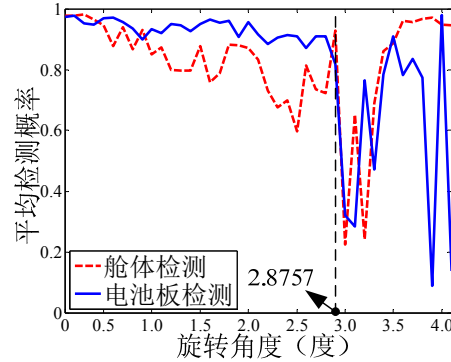


图 4.6 平均检测率-旋转角度曲线图

理想情况下，空间目标 ISAR 图像中心与目标部件 ISAR 图像中心所对应旋转角度 $\Delta\theta = 0^\circ$ 。对于真实数据，本章考虑相邻有效转角的容许范围，其依赖于

$$\Delta\theta = \omega \times (t_2 - t_1) = \Delta n \omega / f_r \quad (4-9)$$

其中， ω 为旋转角速度， t_1, t_2 为两个不同观测时刻， Δn 为相邻有效转角方位向脉冲数目， ω / f_r 为方位步进角度，仿真实验值为 0.1 度；实际应用中旋转角速度 ω 可以由相位对消^[76]、图像自相关系数^[57]等方法获取， f_r 为脉冲重复频率，由发射信号的参数获取。

从图 4.5 可见，随着旋转角度增加，其检测率越低。这是由于空间目标与目标部件散射点特征关系随旋转角度增大而变弱，用以匹配特征点数目变少。通过平均检测率，可以衡量不同部件、转角、信噪比等情况下目标部件检测精度。在图 4.6 中曲线变化中，在旋转角度为 2.8757，对应平均检测率突降。这是由于此处对应的空间目标与目标部件的相关度下降，导致用以计算检测率的有效特征点数目减小。进一步而言，2.8757 度的相对运动姿态下，目标部件与空间目标中对应的部件之间由于姿态变化而造成不相关。此外，在旋转角度大于 2.8757 度时平均检测率出现明显波动，容易出现错误检测。由于相对运动姿态下的旋转角度对目标相关度的影响，平均检测率计算的稳定度会由于匹配特征点数目减少而下降，而图 4.5 中当旋转角度大于 2.8757 度时其累积检测率保持在 5 以下，这说明了匹配特征点数目已经很少，使得图 4.6 中对应的平均检测率达到稳定的极限。具体地，

¹ 数据预处理包括：子回波数据获取，ISAR 成像算法获取原始图像和高斯噪声添加。

舱体检测在旋转角度为 3.5 度时，尽管平均检测率为 0.8853，但对应匹配特征点数目为 4，仅为 0 度旋转角度对应数目 8 半数；同时，电池板检测中在旋转角度为 3.5 度时的平均检测率为 0.9089，但对应匹配特征点数目仅为 1，相比与 0 度旋转角度下的 14 个匹配特征点小很多。因此，在图 4.6 中旋转角度大于 2.8757 时平均检测率波动厉害，其容易受到噪声的影响而波动

然而，文中提出的理想旋转角度是 $\Delta\theta = 0^\circ$ 。通过空间目标与目标部件相对旋转关系，获取使得 $|\Delta\theta| \leq 2.8757^\circ$ 的有效子回波信号对今后实测数据的应用有着重要意义。该实验通过研究旋转角度关系理解目标部件姿态变化对部件检测的影响。

4.3.3 不同信噪比下的目标检测

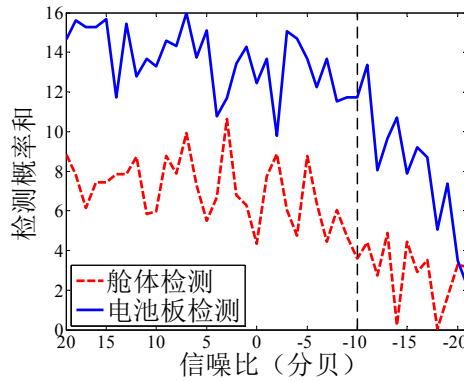


图 4.7 累积检测率-信噪比曲线图

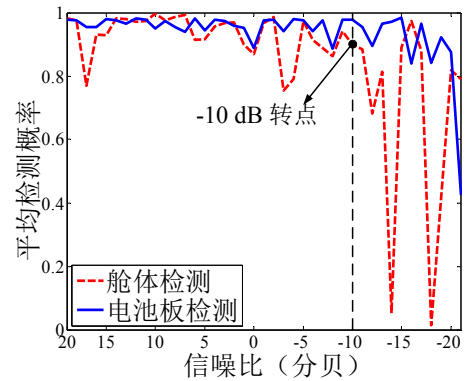


图 4.8 平均检测率-信噪比曲线图

通常，实测回波数据具有较低信噪比。对于不同信噪比下的目标电磁回波数据部件检测验证和优化至关重要。部件回波数据一般在模拟场景下获取，而空间目标回波数据在真实场景中获取，因此其信噪比较低。实验主要通过在原始回波数据中加入不同程度高斯噪声降低空间目标回波数据信噪比，目标部件回波数据信噪比维持在 30dB，得到信噪比实验曲线结果如图 4.7 和图 4.8 所示。

从图 4.7 可以看出，舱体和电池板检测的累积检测率随着信噪比的下降而下降。这是由于信噪比较低的情况下，获取的正确匹配的特征点数目减小，所获取的概率就会减小；图 4.8 获取平均检测率也有类似规律。在 -10dB 转点时舱体检测的平均检测率开始波动，对应于图 4.7 累积检测率较低，这是由于最终匹配的特征点数目较少，容易因噪声影响而发生数目波动，其作为累积检测率的分母，会使平均检测率不稳定而产生起伏变化。当低信噪比等于 -10dB 时，舱体检测仍具有较好检测结果，平均检测率为 0.8991；对于 -20dB 卫星回波数据，电池板检测仍具有较好检测结果，平均检测率为 0.8752。在信噪比为 20dB，旋转角度为 0 度时，舱体检测保留的有效特征点数目为 8，电池板检测保留的有效特征点数目为 15，两者相差较大。对比图 4.7 和图 4.8 的曲线结果，可以分析出对于目标结构较为清晰且信息较为丰富的目标部件，所提取出的有效特征点数目的增加会增大检测率的

稳定性，从而可以在一定程度上解决噪声问题。

图 4.9 为利用全局特征检测方法和本章方法得到的不同结果的对比。可以看出目标结构的局部性特征对于整体部件检测的影响较大，其理论分析可见上述 4.3.1 节。特别地，针对不同信噪比，本实验给出全局特征检测结果和本章方法检测结果，如图 4.10 和图 4.11 所示。图 4.10 第三行结果中，对于 10dB 卫星回波数据，利用全局特征检测方法仍存在错误检测结果，而利用本章方法在-10dB 信噪比下仍可得到准确检测结果。同样地，在卫星电池板检测中，图 4.11 第三行结果反映出高信噪比下利用全局特征方法存在多个部件错误检测结果，而本章方法检测电池板具有与卫星中右侧电池板相同结构和姿态，而左侧电池板具有相同对称结构但不同姿态，并非所需检测的部件。

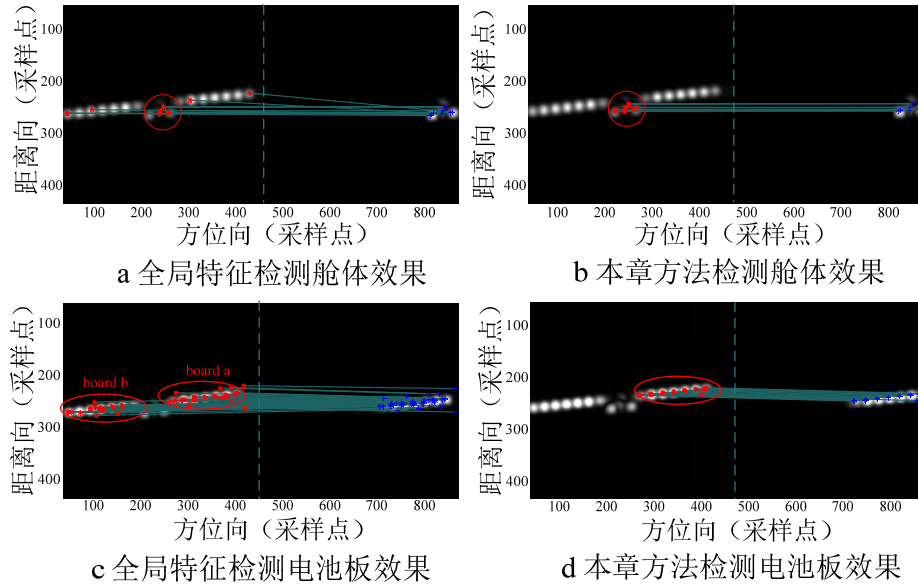


图 4.9 利用全局特征检测方法和本章方法的结果对比

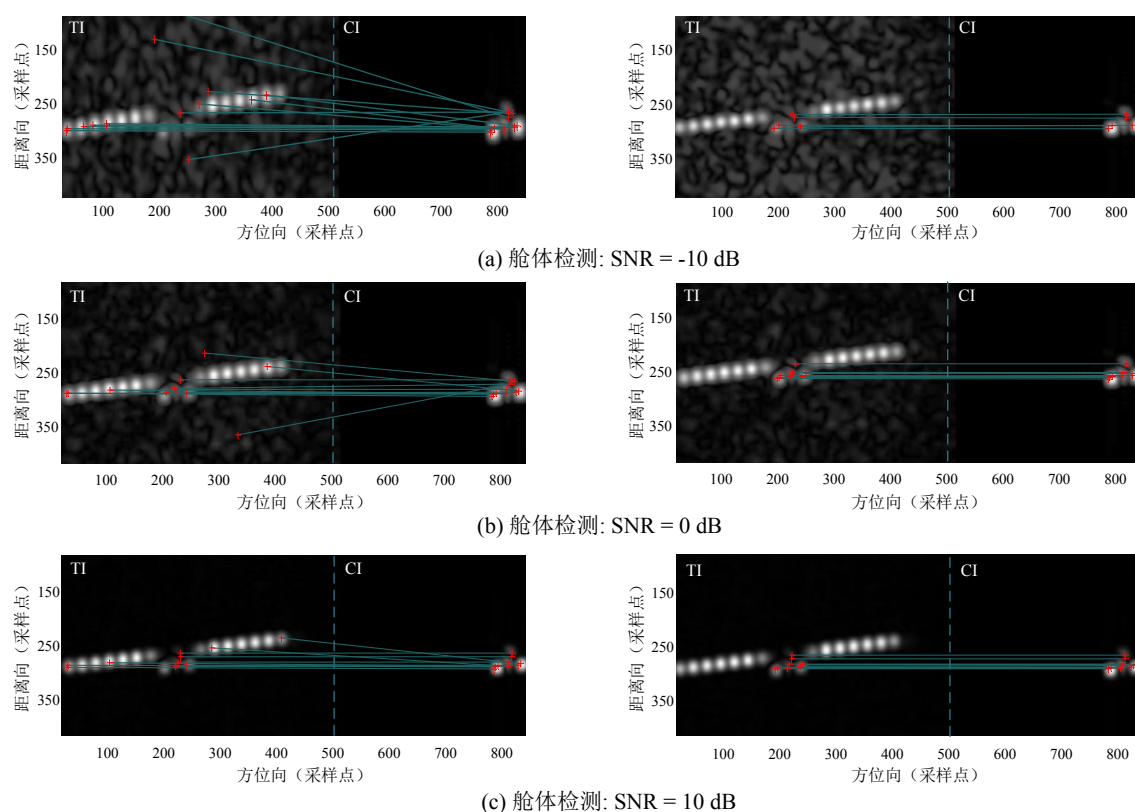


图 4.10 不同信噪比下卫星舱体检测结果, 其中第一列为全局特征检测结果, 第二列为本章方法检测结果

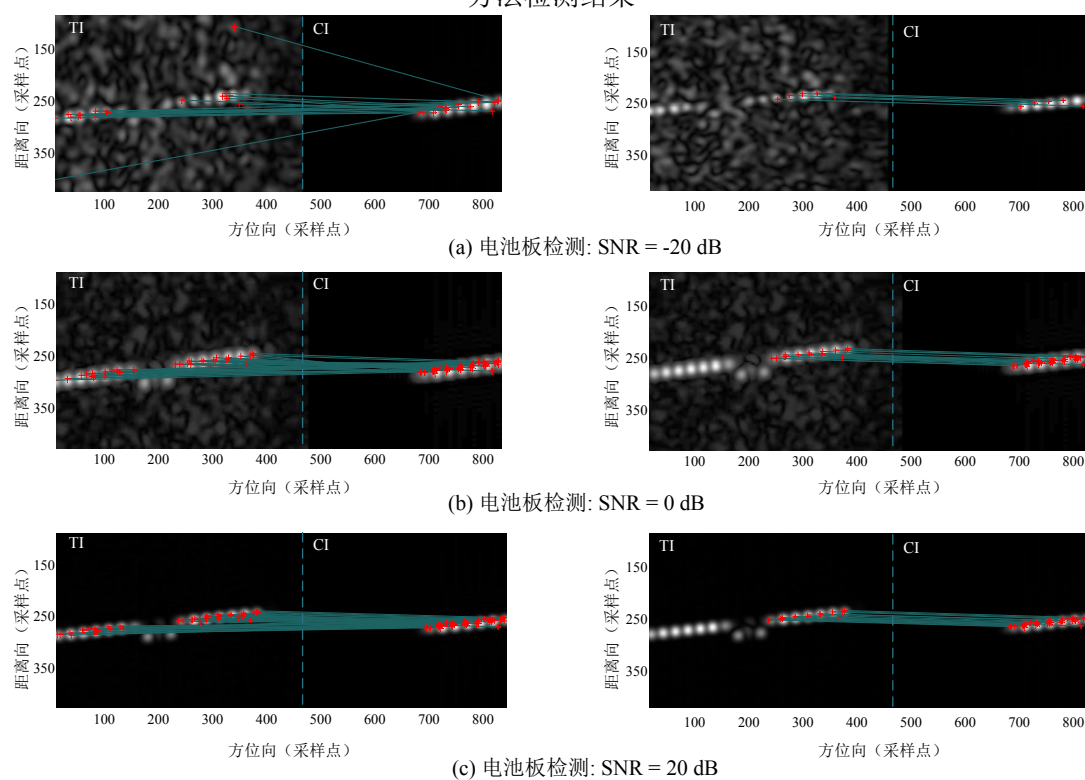


图 4.11 不同信噪比下卫星电池板检测结果, 其中第一列为全局特征检测结果, 第二列为本章方法检测结果

4.4 本章小结

本章提出一种利用 ISAR 图像进行空间目标部件检测方法,该方法通过区域特征匹配和加权高斯概率计算部件累积检测率和平均检测率,通过其最大值判定部件检测精度与正确性。其实现方案总结如下:首先,利用雷达回波数据通过距离多普勒成像后得到图像归一化结果;之后,通过提取出有效稳健的目标特征点,再根据检测部件的特征点位置坐标设计矩形窗口用于局部特征匹配的区域限定;然后以窗口最近特征点作为复杂目标图像中窗口定位点并对图像特征点进行匹配,再通过概率计算出每次正确匹配的高斯概率和,完成全部特征点配准时,以最大高斯概率和所对应特征配准结果作为最佳部件检测。

比较于全局特征检测方法,本章利用特征窗口避免了不同部件中相似特征的干扰,再通过概率方式有效克服了特征窗口所含特征点数目少而导致错误检测的困难。上述实验从检测率分布、旋转角度有效范围、回波数据信噪比、系统仿真用时等方面进行分析,验证了该算法的有效性和快速性。未来工作中,本章方法对真实轨道中空间目标和目标部件 ISAR 数据库进行特定验证,比如从空间站、通信卫星等检测出特定姿态电池板、通信天线等,具有较深研究意义。

第五章 总结与展望

本论文主要对二维高分辨ISAR成像理论和实际应用进行了研究,以二维ISAR序列图像的特征信息提取和模型参数估计为主线。针对连续短相干处理时间下的高分辨ISAR图像,分析了发射雷达信号的目标回波模型和结构特性,并以此提出了一种基于局部图像特征的ISAR方位定标的方法。利用雷达与观测目标之间的回波信号关系,通过分析瞬时雷达斜距与距离多普勒效应,确定影响ISAR成像分辨率的相位因素,并由此提出基于运动速度估计的ISAR自聚焦方法。为了更加完整清晰地对长观测时间下的多视角ISAR目标进行高分辨成像处理,利用典型运动参数估计、目标尺度变化校正和非负矩阵分解,提出结合参数估计和非负矩阵分解的ISAR图像融合方法。同时,通过二维ISAR图像中复杂目标结构特征和兴趣部件结构特征的关系构建,提出了一种结合图像特征和高斯概率的空间目标部件检测的方法。本论文的研究内容由以下几个部分展开说明和总结:

对于所提出的基于局部图像特征的ISAR方位定标,我们首先根据雷达信号模型中方位向和距离向的单元块在图像中的投影信息,构建基于转台模型的旋转矩阵,由于目标图像的平动分量通常可以通过预处理方式进行补偿,因此该部分主要对其所存在的旋转分量进行处理。之后,通过提取特征点在像素上的幅度值关系构建基于尺度的代价函数作为最终迭代判断准则。由于二维ISAR图像中目标定标尺寸通常取决与精准旋转角度估计,因此所需估计的旋转角度应在搜索角度间隔较小和所含迭代计算量之间进行折衷。在实验部分所采用的仿真和实测数据充分说明了所提出方法的有效性和高精度,对比于现有方法,其在处理时间上有着明显优势。但是,需要注意的是该方法主要是通过序列图像进行特征关系建立,如果该序列图像之间存在明显结构差异或者两者信噪比相差甚远,往往会导致提取特征无法代表相同结构特性,从而导致相同结构的特征关系难以建立,难以精确估算其旋转角度。

利用上述提出的序列图像之间的旋转角度估计方法,可以精确地计算出其对应旋转角速度,通过雷达瞬时斜距推导出目标回波信号中相位关系中一次相位和二次相位。针对这两项相位对ISAR图像的聚焦性能,可以通过相位消除方法,提高自聚焦性能并且对目标进行定标。由于该自聚焦性能在方位向的提高主要依赖于二次相位,当目标无转动运行或者运行效果导致的二次相位对本身成像的自聚焦影响不大时,则该方法估计的旋转角速度对提高方位向上的自聚焦性能无影响,具有一定局限性。但对于具有明显二次相位的旋转观测目标,其具有较高精度和稳定性。

对于结合参数估计和非负矩阵分解的ISAR图像融合,本文所利用的方法主要依赖于局部特征信息在序列图像中的模型关系,通过该模型关系计算出两两短相干处理时间下的ISAR图像之间的运动参数,并通过搜索方式估计出方位尺度变换

因子，利用所提取特征点和图像结构在方位向上实行校正。之后，利用奇异值分解方法估算出对应旋转角度，从而对已进行方位尺度校正的 ISAR 序列图像进行姿态统一。由于通常情况下不同的 ISAR 图像，尤其是观测时间较长的全孔径回波所对应的 ISAR 图像，其截取的子孔径数据在能量级上会存在一定差异，严重的会出现不同图像出现无关的全局偏亮或者偏暗。为了避免这种情况并充分使得细微变化的局部结构能够完整地在 ISAR 图像中显示，本文利用非负矩阵分解方法。实验充分说明了方位尺度因子的引入对于聚焦性能的提高，同时所采用的融合方法，能够精确完整地呈现长观测时间下的目标完整的局部结构，避免了因关键散射结构丢失而使目标部件鉴别和观测准确度下降。

对于提出的结合图像特征和高斯概率的空间目标部件检测方法，本文主要是对空间目标进行处理，因为空间目标具有较为稳定的运行轨道，能够较好地保证得到的 ISAR 图像具有高质量和清晰结构。该方法主要是利用复杂目标中所含的典型结构和已有的典型部件结构进行配准，通过构造的特征窗口避免了无关和相似结构特征影响，并且所采用的加权高斯概率计算方法充分应用了目标结构的幅值信息。由于实验中验证了复杂目标与典型部件之间存在较为微妙的姿态角度关系，即如果两者的相对旋转角度或者相对观测姿态相差太大(约为 3 度)，则会削弱检测精度。而对于理想情况下的 0 度相对旋转角度，其检测精度和抗噪能力均较高，可以通过实验中信噪比相关曲线验证。该方法对于未来实际应用中的快速目标典型部件的检测具有较好的参考意义和应用价值。

参考文献

- [1] Axelbank M, Camp WW, Lynn VL, *et al.* ALCOR—A High-Sensitivity Radar with One-Half-Meter Range Resolution[C]. IEEE 71th International Conv. Dig., New York, Mar. 1971: 112–113.
- [2] Chen VC, Qian S. Joint Time-Frequency Transform for Radar Range-Doppler Imaging. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems[J], 1998, 34(2): 486–499.
- [3] Chen VC. Adaptive Time-Frequency ISAR Processing[C]. SPIE, 1996: 133–140.
- [4] Chen VC. Analysis of radar micro-Doppler with time-frequency transform[C]. in Proceedings, 10th IEEE Workshop on Statistical signal and array processing. Pocono Manor, PA, USA, Aug. 2000: 463–466.
- [5] Chen VC, Li F, Ho S, *et al.* Micro-doppler effect in radar-phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2–21.
- [6] Li J and Ling H. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. in IEE Proceedings, Radar Sonar Navig. August 2003, 150(4): 284–291.
- [7] Cuomo KM, Piou JE, and Mayhan JT. Ultrawide-Band Coherent Processing[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, June 1999, 47(6): 1094–1107.
- [8] Soumekh M and Nugroho S. ISAR imaging of an airborne DC-9[C]. in Proceedings, ICASSP. 1993: 465–468.
- [9] Li JF. Model-Based Signal Processing for Radar Imaging of Targets with Complex Motions[D]. The University of Texas at Austin, August, 2002 Dissertation.
- [10] Freeman EC. MIT Lincoln Laboratory: Technology in the National Interest Lincoln Laboratory[R]. Lexington, Mass., 1995: 118–119.
- [11] Lee JS, Ainsworth TL, and Wang Y. Recent advances in scattering model-based decompositions: an overview[C], in Proceedings, IGARSS, Vancouver, BC, Canada, 2011: 9–11.
- [12] Ausherman DA, Kozma A, Walker JL, *et al.* Developments in Radar Imaging[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(4): 363–399.
- [13] 史仁杰. 雷达反导与林肯实验室[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(11): 1781–1799.
- [14] 张池平. 多传感器信息融合方法及其在空间目标识别中的应用[D]. 博士学位论文, 哈尔滨工业大学, 2006.
- [15] 戴征坚, 郁文贤, 胡卫东等. 空间目标的雷达识别技术[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(3): 19–22.

- [16] Rihaczek AW and Hershowitz SJ. Radar Tracking and Observation of Noncooperation Space Objects Due to Reentry of SALYUT-7/KOSMOS-1686[R], 1996, N92-23968.
- [17] Herbert GW. The Millstone and Haystack Radars[J]. IEEE Transaction on AES. 2001, 37(1): 365-379.
- [18] MIT Lincoln Laboratory 2009 Annual Report[R]. www.ll.mit.edu.
- [19] Novak LM, Owirka GJ, Brower WS, *et al.* The Automatic Target Recognition System in SAIP[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1997, 10 (2): 187-202.
- [20] Leslie MN, Gregory O, and Christine MN. Performance of a high-resolution polarimetric SAR automatic target recognition system[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1993, 6 (1): 11-25.
- [21] Liu C, Vachon PW, and Geling GW. Improved Ship Detection With Airborne Polarimetric SAR Data[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2005, 31 (1): 122-131.
- [22] Martorella M, Giusti E, Demi L, *et al.* Target Recognition by Means of Polarimetric ISAR Images[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47 (1): 225-239.
- [23] Margarit G, Mallorqui JJ, Fortuny-Guasch J, *et al.* Phenomenological Vessel Scattering Study Based on Simulated Inverse SAR Imagery[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (4): 1212-1223.
- [24] Margarit G, Mallorqui J, and Fabregas X. Single-Pass Polarimetric SAR Interferometry for Vessel Classification[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45 (11): 3494-3502.
- [25] 曹向东. 空间目标成像的 ISAR 技术研究[D]. 南京理工大学硕士学位论文, 2007.
- [26] 高勋章. 基于高阶统计量得雷达目标高分辨成像研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2004.
- [27] 马君国. 空间雷达目标特征提取与识别方法研究[D]. 国防科技大学博士学位论文, 2006.
- [28] 许人灿, 黄小红, 陈曾平. 空间目标一维距离像高速运动补偿方法研究[J]. 信号处理, 2007, 23(4): 607-610.
- [29] 余志舜, 朱兆达. 逆合成孔径雷达横向距离定标[J]. 电子学报, 1997, 2(6): 45-48.
- [30] 王勇, 姜义成. 一种估计 ISAR 成像转角的新方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 521-523.
- [31] Yeh CM, Xu J, Peng YN, *et al.* Cross-Range Scaling for ISAR Based on Image Rotation Correlation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Jul., 2009, 6(3): 597-601.
- [32] Xu F, Jin YQ. Deorientation Theory of Polarimetric Scattering Targets and Application to Terrain Surface Classification[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43 (10): 2351-2364.
- [33] Zhou JX, Shi ZG, Cheng X, *et al.* Automatic Target Recognition of SAR Images Based on

- Global Scattering Center Model[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (10): 3713–3729.
- [34] 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1998.
- [35] 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.
- [36] 邱晓晖, 朱兆达. 一种用于 ISAR 成像的转角采样不均匀补偿方法[J]. 现代雷达, 1996, 18(3): 1–6.
- [37] 姜正林, 保铮. 低分辨雷达目标成像的横向距离定标[J]. 电子与信息学报, 2001, 23(4): 365–372.
- [38] Martorella M. Novel approach for ISAR image cross-range scaling[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(1): 281–294.
- [39] 逢勃, 张然, 张磊. 一种 ISAR 目标转动估计和方位定标方法[J]. 雷达与对抗, 2013, 33(2): 40 – 57.
- [40] Kim M, Wu GR, Yap PT, *et al.* A general fast registration framework by learning deformation–appearance correlation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1823–1833.
- [41] Lammers UHW and Marr RA. Doppler imaging based on radar target precession[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1): 166–173.
- [42] Reddy BS and Chatterji BN. An FFT-based technique for translation, rotation, and scale-invariant image registration[J]. IEEE Transactions on Pattern, Analysis and Machine Intelligence, 1996, 5(8): 1266–1271.
- [43] Xiong Zhen and Zhang Yun. A novel interest-point-matching algorithm for high-resolution satellite images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(12): 4189–4200.
- [44] Lowe DG. Distinctive image features from scale-invariant key-points[J]. International Journal of Computer Version, 2004, 60(2): 91–110.
- [45] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, *et al.* Speeded-up robust features (SURF)[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346–359.
- [46] Raguram R, Chum O, Pollefeys M, *et al.* USAC: a universal framework for random sample consensus[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(8): 2022–2038.
- [47] Wang Shanhu, You Hongjian, and Fu Kun. BFSIFT: a novel method to find feature matches for SAR image registration[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(4): 649–653.
- [48] Sheng Jialian, Duan Jia, Xing Mengdao, *et al.* Cross-range scaling combining motion compensation for ISAR imaging[C]. IET International Radar Conference, Xi'an, Apr. 2013:

1-6.

- [49] 杨磊, 熊涛, 张磊等. 应用联合自聚焦实现低信噪比 ISAR 成像平动补偿[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(3): 63-71.
- [50] Wu Yufeng, Sun Guangcai, Xia Xianggen, *et al.* An improved SAC algorithm based on the range-keystone transform for Doppler rate estimation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(4): 741-745.
- [51] 仲利华, 胡东辉, 丁赤飏等. 一种稀疏孔径下大尺寸目标的 ISAR 成像方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 292-300.
- [52] Luc V. Multi-look autofocus in high resolution inverse SAR imaging[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Turkey, Jun. 2000, 5: 3029-3032.
- [53] Wu Yihong and Verdú S. Functional properties of minimum mean-square error and mutual information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2012, 58(3): 1289-1301.
- [54] Wang GY and Bao Z. The minimum entropy criterion of range alignment in ISAR motion compensation[C]. Proceeding Conference Radar'97, Edinburgh UK, 1997, 10: 14-16.
- [55] Steinberg BD. Microwave imaging of aircraft[C]. IEEE Proceeding, 1988, 76(12): 1578-1592.
- [56] Xing M, Wu R, Lan J, *et al.* Migration through resolution cell compensation in ISAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 2(1): 141-144.
- [57] Park SH, Kim HT, and Kim KT. Cross-range scaling algorithm for ISAR images using 2-D Fourier transform and polar mapping[J]. IEEE Transaction Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 49(2): 868-877.
- [58] Cao P, Xing M, Sun G, *et al.* Minimum entropy via subspace for ISAR autofocus[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 7(1), 2010: 205-209.
- [59] Narayanan RM, Li Z, and Papson S. Fusion of multiple-look synthetic aperture radar images at data and image levels[C]. 5th ICEEE, Mexico, November 2008: 508-513.
- [60] Chen FL, Zhang H, and Wang C. A Novel Feature Matching Method in Airborne SAR Image Registration[C]. IGARSS '05, Proceedings. IEEE International, 2005, 7: 4722-4724.
- [61] Harris C, and Stephens M. A combined corner and edge detector[C]. 4th Alvey Vision Conference, August 1988: 147-151.
- [62] Rosten E, Porter R, and Drummond T. Faster and better: A machine learning approach to corner detection[J]. IEEE Transaction on Pattern, Analysis and Machine Learning, 2010, 32(1): 91-110.
- [63] Horn BKP. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(4): 629-642.
- [64] Lee DD, and Seung HS. Learning the parts of objects by nonnegative matrix factorization[J].

- Nature, 1999, 401: 788–791.
- [65] Lee DD, and Seung HS. Algorithms for non-negative matrix factorization[C]. NIPS, Denver, CO, USA, July 2000.
- [66] Mehrholz D. Radar techniques for the characterization of meter-sized objects in space[J]. Advances in Space Research, 2001, 28(9): 1259–1268.
- [67] Stansbery EG, Kessler DJ, Tracy TE, *et al.* Characterization of the orbital debris environment from Haystack radar measurements[J]. Advances in Space Research, 1995, 16(11): 5–16.
- [68] Wang TL and Jin YQ. Postearthquake building damage assessment using multi-mutual information from pre-event optical image and postevent SAR image[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(3): 452–456.
- [69] Gamba P, Acqua FD, Lisini G, *et al.* Improved VHR urban area mapping exploiting object boundaries[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(8): 2676–2682.
- [70] 陶文兵, 田岩, 张钧等. 航空图像矩形建筑物自动提取方法研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(4): 341–347.
- [71] Sirmacek B, Unsalan C. A probabilistic framework to detect buildings in aerial and satellite images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 211–221.
- [72] Sirmacek B and Unsalan C. Urban area detection using local feature points and spatial voting[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(1): 146–150.
- [73] 赵凌君, 高贵, 匡纲要. 基于分水岭变换的单幅高分辨率 SAR 图像建筑物检测方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1984–1990.
- [74] Unsalan C. Measuring Land Development in Urban Regions Using Graph Theoretical and Conditional Statistical Features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(12): 3989–3999.
- [75] 陶超, 谭毅华, 蔡华杰. 面向对象的高分辨率遥感影像城区建筑物分级提取方法[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 30–45.
- [76] Jiemin Hu, Wei Zhou, Yaowen Fu, *et al.* Uniform Rotational Motion Compensation for ISAR Based on Phase Cancellation[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Jul., 2011, 8(4): 636–640.

致谢

两年半充满了各种辛酸与喜悦、失去与收获的硕士生涯即将结束，回首刚进实验室时的一无所知，到今天能够为自己的目标不断拼搏。时至今日，我借此论文表达对在这期间不断帮助我、引导我的家人、导师、朋友和同事深深的感激。

首先，我要感谢的是邢孟道教授。记得当初考研时，邢老师是我第一个联系的老师，也是第一个回复我邮件的老师。当初看了邢老师优秀的简历再加上实验室学长对邢老师高度评价，我当时已铁了心当邢老师学生。邢老师对学生和蔼、友好的态度和在科研上不断的鼓励，使我受益匪浅。

其次，衷心地感谢我的副导师张磊老师。张老师在我硕士生涯中有着科研启蒙作用。“老师”这个词对我而言一般都比较严肃，但是张老师打心眼里让我感到他不仅仅是一位老师，更多的是我在这个陌生城市的一位兄长。记得12年4月份复试回家火车上接到张老师的电话问暑假要不要过来实验室，到12年8月底来西电报到第一件事是到办公室跟张老师交流今后硕士生涯规划，和张老师交流后，我觉得自己顿时轻松很多。这一路过来张老师不断地帮助我，事无巨细，不得不承认张老师对学生无微不至的关心和科研上耐心深刻而又严格的要求对我两年半发展有着深深作用。

非常感谢考研时不断给我帮助和鼓励的何振学长和学敬学长，华大有你们这样团结互助的学长着实是一份荣耀。也非常感谢一直以来默默鼓励我的同学冉磊，虽然是不同副导师，做着不同课题，但不管科研上还是科研外都一直分担着喜悦和辛苦。感谢徐刚学长在科研上和生活上的各种帮助，学长幽默风趣和稳重的性格真的很难得。同时，徐刚学长在科研上的严谨和广博的知识是我学习的榜样。

非常感谢实验室段佳学姐和吴敏学姐一直以来如姐姐般对学弟的关心，学姐们淡然冷静的心态值得我去学习。同时，非常感谢实验室的大荣学长。记得13年年初时和大荣学长出差，大荣学长所表现出的担当和毅力很令我敬佩。还要感谢我的老乡双喜学长和廖轶学长，他们对老乡学弟很好，当初刚来实验室时老乡给我的感觉真的很亲切，尤其是对刚出远门求学的我。感谢我的舍友左绍山、李震宇和李乐，让条件不堪杂乱的宿舍充满乐趣。感谢和我一起考进西电的四位朋友张杰、林锦鹏、郭亚萍和陈雁飞。他们的相伴相随使得初到西安的我不感孤独，他们总是能够和我一起分担。也很感谢那些不在身边却一直保持联系的初中和本科老师、同在异乡求学的同学和一直默默关心我的初中同学-建琴。

最后，真诚地感谢我的父母、懂事的弟弟、无时无刻都在关心我的外公、阿姨、大舅、二舅、三舅和其他所有关心我的家人。每当在我感到快要崩溃的时候，

老妈总是能够及时开导我，不管我做出的决定和结果是否令你满意，老妈总是说努力就好，人生不是只有一个选择。父母所给予我的远非其他人能够给予和取代的亲情，这些我会永永远远记在心里。突然觉得我要感谢的人太多，从小学到硕士生活，总是有很多老师不同程度地宠着我，同学朋友默默地关心帮助着我。不管未来怎么样，真心希望自己能够发展好，待到有一天你们需要我时，我能够有能力去回报你们。觉得两年半硕士生活真的没有白过，不管是否关乎科研，都让我觉得成长了不少。

作者：许志伟

二零一四年十一月于西安

作者简介

1. 基本情况

男, 福建泉州人, 1990 年 12 月出生, 西安电子科技大学电子工程学院信号与信息处理 2012 级硕士研究生。

2. 教育背景

2008.09~2012.06 就读华侨大学信息科学与工程学院电子信息工程专业, 获工学学士学位
2012.08~ 就读西安电子科技大学电子工程学院信号与信息处理专业硕士研究生

3. 攻读硕士学位期间的研究成果

3.1 发表的学术论文

- [1] **Zhiwei Xu**, Lei Zhang, and Mengdao Xing, “Precise Cross-Range Scaling for ISAR Images Using Feature Registration”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10), pp: 1792–1796 (SCI: 000337174100026)
- [2] **Zhiwei Xu**, Lei Zhang, Mengdao Xing, Karen M. von Deneen, and Lei Ran, “Interesting components detection for space satellites from ISAR image via feature probabilistic estimation”, IET Image Processing (SCI 录用排版中)
- [3] **Zhiwei Xu**, Lei Zhang, and Mengdao Xing, “Azimuth Sclaing for ISAR Radar Images with Feature Registration”, Image and Signal Processing, 6th IEEE Congress, Hangzhou, China, 3, pp: 1568–1572. 2013 (EI 检索)
- [4] **Zhiwei Xu**, Lei Zhang, Mengdao Xing, and Gang Xu, “Uniform Rorational Motion Compensation for ISAR Targets from Image Domain”, IEEE 2nd China SIP, Xi’an, China, pp: 166-170, 2014 (EI 检索)
- [5] 许志伟, 张磊, 邢孟道, “基于局部特征配准的目标部件检测方法”, 2013 西安电子科技大学研究生学术年会, 2013, pp: 57–66
- [6] Lei Zhang, Hao-lin, Li Zhi-jun Qiao, and **Zhi-wei Xu**, “A Fast BP Algorithm With Wavenumber Spectrum Fusion for High-Resolution Spotlight SAR Imaging”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9), pp: 1460–1464 (SCI: 000333105400002)

3.2 软件著作权及发明专利

- [1] 第一单位西安电子科技大学, “ISAR 数据与图像处理系统 V1.0”, 登记号 2014SR012993
- [2] 张磊, 许志伟, 邢孟道, 段佳, 徐刚, “基于图像特征的 ISAR 图像几何定标方法”, 申请号 201310647712.8
- [3] 张磊, 许志伟, 邢孟道, 董祺, 吴敏, “基于局部特征匹配的 ISAR 目标部件检测方法”,

申请号 201310648787.8

[4] 张磊, **许志伟**, 吴敏, 董祺, 邢孟道, “基于高斯概率和的 ISAR 目标部件检测方法”, 申请号 201410218699.9

[5] 张磊, **许志伟**, 邢孟道, “基于目标特征的 ISAR 目标融合方法”, 申请号 201410445675.7

[6] 张磊, 吴敏, **许志伟**, 段佳, 邢孟道, “基于分布式压缩感知全极化 SAR 超分辨成像方法”, 申请号 201410106245.2

[7] 张磊, 董祺, 全英汇, **许志伟**, 徐刚, “基于属性散射中心模型 ISAR 目标分解重构方法”, 申请号 201310653886.5

[8] 张磊, 董祺, 全英汇, **许志伟**, 徐刚, “分段线性估计的多项式拟合 ISAR 包络对齐方法”, 申请号 201310655227.5