

博士学位论文

星载 SAR 几何定标模型与方法研究

博士 赵瑞山

导师 杨帆（教授）

张过（教授）

专业名称 大地测量学与测量工程

辽宁工程技术大学

二〇一七年十二月



辽宁工程技术大学

博士 学位 论 文

星载 SAR 几何定标模型与方法研究

Research on Model and Method of Geometric Calibration
for Space-borne SAR

作 者 赵瑞山

导 师 杨 帆 教授

张 过 教授

专 业 大地测量学与测量工程

二〇一七年十二月

分类号 P237

学校代码 10147

UDC 528. 8

密 级 公开

博士 学位 论文
星载 SAR 几何定标模型与方法研究

**Research on Model and Method of Geometric Calibration
for Space-borne SAR**

作者姓名 赵瑞山

指导教师 杨帆 教授

张过 教授

申请学位 工学博士

学科专业 大地测量学与测量工程

研究方向 微波遥感技术与应用

辽宁工程技术大学

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者及指导教师完全了解辽宁工程技术大学有关保留、使用学位论文的规定，同意辽宁工程技术大学保留并向国家有关部门或机构递交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，学校可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。

保密的学位论文在解密后应遵守此协议

学位论文作者签名： 赵瑞山

导师签名： 孙伟光

年 月 日

年 月 日

学位论文原创性声明

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的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。其他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。

本人学位论文与资料若有不实，愿意承担一切的法律责任。

学位论文作者签名： 赵瑞山

年 月 日

致 谢

光阴荏苒，日月如梭，博士求学的生涯转瞬即逝。回首自己走过的求学路，数不清有过多少个日夜的挑灯苦读，数不清经历过多少次的失败和挫折。读博期间，有快乐，也有忧伤，有辛勤，也有迷茫，有努力，也有放弃，有收获，也有遗憾。然而，酸甜苦辣的博士生活并非我一个人走过，得到了身边太多的老师、同学、亲人和朋友们的关心与帮助，我才坚定信心、顺利完成了博士论文，衷心感谢各位！

感谢我的导师杨帆教授，师恩厚重如山，博大如海。正是杨老师的鼓励与支持，我才有勇气继续攻读博士学位，我才有幸进入现在的研究领域。杨老师不仅是我学业上的导师，更是我人生的导师。他在学术上学识渊博、思维深邃、治学严谨 在为人处世上平易近人、谦虚谨慎、孜孜不倦、淡泊名利。杨老师在学业、生活和工作上给予了我严师般的指导、慈父般的帮助和关怀，可以说我的每一步成长都与他的悉心教诲和帮助密不可分。我还要感谢我的师母邵阳老师在生活上对我的关心和鼓励。感谢两位老师的恩情！

感谢武汉大学的合作导师张过教授，在张老师的悉心指导和帮助下完成了博士论文的选题和研究。在学术研究上，张老师为我指明了研究方向，给予了我多次参与重大科研项目的机会，拓宽了眼界；在日常生活上，张老师给予了我无私的关怀和帮助，确保我可以安心做科研。张老师学识渊博、思维缜密、见识非凡、求真务实、成就斐然，在学术和为人处世等方面深深感染了我，使我终身受益。在此，致以最诚挚的感谢！

沉痛缅怀德国地球科学研究中心夏耶教授。夏老师是中国 InSAR 技术的引入者和领路人，也是我进入 SAR 领域的启蒙老师。夏老师循循善诱的指导为我今后的研究奠定了坚实的理论基础。虽然夏老师于 2014 年离开了我们，但是他严谨求实的工作态度、热情幽默的性格以及在学术上具有独立、据实、亲身实践、精益求精的精神，值得我永远学习。衷心感谢、怀念夏老师！

感谢北京市遥感信息研究所的张永军研究员。张老师是我国 SAR 领域的知名专家，有幸得到张老师的悉心指导，使我对星载 SAR 成像等信号处理方面有了更深入的认识，拓展了我在星载 SAR 领域的研究。张老师谦逊的性格和耐心的态度令我深深敬佩，衷心感谢张老师！

感谢母校的徐爱功教授、宋伟东教授、王崇倡教授、裴亮教授、李玉教授、祝会忠副教授、孙伟教授、赵泉华教授以及国防科技大学的邱涤珊教授、武汉大学的方圣辉教授、江万寿研究员、许妙忠教授、杨杰教授、中南大学的李志伟教授、中国地质大学（武汉）的牛瑞卿教授在开题过程中高屋建瓴地提炼论文的研究主线，在预答辩过程中指出论文存在的核心问题并提炼论文的创新点；感谢国家地理信息局卫星测绘应用中心唐新明研究员、高小明主任、祝小勇博士、刘浩博士、王光辉博士、郭莉博士、李涛博士、陈乾福硕士等，

感谢北京市遥感信息研究所梁亮博士、丁一帆博士、黄建军博士、田菁博士、孙希龙博士、刘萃锴博士、赵博威硕士等，感谢航天科技集团中国空间技术研究院朱宇研究员、于海锋博士、倪崇博士、肖刚博士、赵秉吉博士、韩晓磊博士、王涛博士、何德华博士等，感谢国家海洋局第二海洋研究所陈鹏副研究员，感谢信息工程大学黄小波主任，感谢中国科学院电子学研究所仇晓兰副主任、梁维斌博士、黄丽佳博士、刘佳音博士、王峰博士等，感谢上述老师们在课题研究中给予的各方面帮助。

感谢母校的卜丽静老师、徐佳老师、周欣威老师、乔仰文老师、吉长东老师、鲍勇老师、隋心老师、董晓春老师、张正鹏老师、耿继原老师以及所有的老师，感谢读博期间的关心与支持；感谢武汉大学的师兄汪韬阳老师、蒋永华老师、沈欣老师和中南大学的潘红播老师，感谢在武汉大学读博期间科研工作的关照；感谢武汉大学的同级好友杨刚博士、谢志伟博士、王晓博士、赵金奇博士，感谢武汉大学读博期间生活上的帮助，使枯燥的博士生活变得绚丽多彩；还要感谢武汉大学张过老师团队的李立涛、陈振炜、郑玉芝、李少宁、邓明军、张浩、管志超、史潇天、徐凯、崔子豪、陈首彬、王京印、郭雪瑶、余磊等，感谢在平时研究工作中给予的帮助；感谢武汉大学已毕业的黄文超博士、李贞硕士、李贝贝硕士、邱双双硕士、王晶晶硕士、康晶硕士、贺涛硕士、方辰硕士、李凡硕士、周忠芬硕士、王强硕士、王青硕士等，感谢武汉大学读博期间的朝夕相处，留下了美好的回忆。

感谢母校 2012 级的博士班同学们，感谢赫飞老师、吴作启、吴佳奇、朱志洁、罗浩、魏晓刚、杜亚志、梁帅、崔铁军、杨洋、王舰等对我的帮助，能够一起读博是个缘分，很高兴与各位同学相识。感谢母校杨帆老师团队的师弟师妹们，感谢张子文、郭正一、谢佳君、赵利民、常俊飞、郭建华、王小兵、谢洋洋、田振凯、王瀚斌、赵增鹏、常文蝶、李家琪、吕磊、张磊、王道顺、唐伟智、许志涵、赵业隆等对我的支持与帮助。

感谢父母对我的养育之恩，感谢亲朋好友对我的关心、支持与帮助。

最后，再次对所有关心、支持和帮助过我的老师、同学、亲朋好友致以最诚挚的谢意！

赵瑞山

2017 年 9 月 13 日

摘要

自 2006 年至今，我国已陆续设计并成功发射 5 型 10 余颗高分辨率合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 遥感卫星，使我国可以快速实现“全球测图”成为可能。多年来随着我国星载 SAR 多项关键技术的攻关，我国 SAR 遥感卫星各项性能指标逐步趋于国际先进水平，例如分辨率可达到亚米量级。尽管如此，大部分国产 SAR 卫星影像数据仍未得到充分的有效利用，造成了大量的国产 SAR 卫星数据浪费。主要由于我国 SAR 卫星部分硬件的设计与制造水平限制，导致了国产高分辨率 SAR 卫星影像的几何定位精度差，严重限制了国产 SAR 卫星影像产品的广泛应用。因此，国产 SAR 卫星影像的几何质量问题影响其应用效果的重要因素。

针对国产 SAR 卫星几何定位精度差的问题，详细分析影响 SAR 卫星几何定位精度的关键因素，通过高精度几何模型构建、地面控制点获取和几何定标方法研究，消除国产 SAR 卫星的系统误差，提升国产 SAR 卫星几何定位精度。主要研究内容如下：

(1) 构建了星载 SAR 高精度几何模型。

基于星载 SAR 几何定位误差影响因素分析，构建了星载 SAR 卫星严密几何模型和通用几何模型；通过考虑斜视角的影响，提出了一种改进的 ASF 数值解法，解决了大斜视成像条件下 ASF 数值解法无解的问题；在理想卫星轨道上构造出正侧视成像的 SAR 卫星，采用虚拟重成像技术生成零多普勒条件的 SAR 影像，消除 RPC 模型在方位向上因非零多普勒成像引起的拟合误差。

(2) 研究了高精度地面控制点的获取方法。

针对人工角反射器布设成本高、效率低等问题，通过无线网络控制伺服电机带动角反射器转动，提出了一种常态化、高精度的自动角反射器设备设计方法，实现了远程控制、无人值守的工作模式；根据角反射器点在 SAR 影像上的成像特性，基于人工初判和质心算法提出了一种半自动高精度角反射器点提取方法；针对无法拍摄几何定标场区域的星载 SAR 影像，根据光学影像和 SAR 影像的成像机理和影像纹理，提出了一种基于光学遥感影像的星载 SAR 影像控制点获取方法。

(3) 提出了星载 SAR 高精度几何定标方法。

从雷达信号特性与几何定位精度之间的关系出发，根据雷达信号的时宽和带宽组合确定几何定标方案，利用全球大气环境参考数据消除时变的大气传播延迟影响，提出了一种顾忌大气传播延迟改正的星载 SAR 多模式混合几何定标方法，并与经典方法进行了优缺点对比；基于星载 SAR 系统的斜距成像特性，利用相同入射角条件下可消除因高程误差引起

的投影差的原理，提出了一种基于同名点约束的交叉几何定标方法，解决星载 SAR 系统在无高精度地面控制数据的情况下仍可实现高精度的几何定标。

(4) 实验分析了国产 SAR 卫星的几何定位精度。

以遥感 13 号卫星和高分三号卫星为例，针对本文提出的两种几何定标方法，利用中国嵩山遥感卫星定标场的常态化定标设备进行了实验和分析，并结合山西太原、河北安平、湖北咸宁、天津等地区的地面控制数据验证了国产星载 SAR 影像经几何定标后的几何定位精度。利用本文提出的虚拟重成像方法构建 RPC 模型，对遥感 7 号 SAR 影像的平面和高程精度进行评价，验证本文所提出模型和方法的正确性和有效性。

关键词：星载 SAR；几何定标；多模式混合几何定标；交叉几何定标；自动角反射器

Abstract

Since 2006, high resolution SAR remote sensing satellites, including five types and ten satellites, have been successfully designed and launched from China. It is possible for our country to realize the global mapping quickly. Over the years, with the break of many key technologies for domestic SAR satellite, the performance of SAR remote sensing satellite in China is gradually reached the international advanced level, such as the implementation of sub-meter resolution. However, the contradiction with the strong ability of data acquisition is that most of domestic SAR satellite image have not been fully utilized, resulting in a large number of satellite data waste. However, due to the limitation of the hardware level of the domestic SAR satellite, the positioning accuracy of domestic high resolution SAR satellite images is poor, which limits the wide application of domestic SAR satellite image products. The reason is that the geometric quality of domestic SAR satellite images is an important factor which affects its application.

In order to solve the problem of poor positioning precision of SAR satellite in China, the key factors affecting the positioning accuracy of SAR satellite are analyzed in detail. By means of high precision geometry model, ground control point and geometric calibration method, the system errors of domestic SAR satellite are eliminated, and the positioning accuracy of domestic SAR satellite is improved. Taking this as the theme, the following topics are researched in this paper.

(1) The high precision geometric model of domestic SAR satellite is constructed.

Firstly, based on the analysis of influence factors of geometric positioning error for spaceborne SAR, a rigorous geometric model and a general geometric model of spaceborne SAR satellite are constructed. Secondly, an improved ASF numerical method is proposed to solve the problem of ASF numerical solution without solution under the condition of large squint imaging by considering the influence of squint angle. Then, the virtual re-imaging method of spaceborne SAR satellite is studied, which improves the fitting precision of rational polynomial coefficient (RPC) model in azimuth.

(2) The acquisition method of high precision ground control points is studied.

Firstly, Aiming at the problem of artificial corner reflector with high cost and low efficiency, this paper proposed a design method of automatic corner reflector equipment with an advantage of normalization, high precision, remote control and unattended operation. Secondly, according to the imaging characteristics of corner reflector on SAR image, a semi-automatic high-precision

corner reflector point extraction method is proposed based on artificial initial judgment and centroid algorithm. Then, in view of the spaceborne SAR images which can not be taken in the field of geometric calibration, according to the imaging mechanism and imaging texture between optical image and SAR image, an acquisition method of control point is proposed based on optical remote sensing image, which is the effectively supplement for the control points acquirement of spaceborne SAR image.

(3) High precision geometric calibration method for domestic SAR satellite is proposed.

Firstly, based on the analysis of the relationship between radar signal characteristics and geometric positioning accuracy, this paper presents a multi-mode hybrid geometric calibration method of SAR satellite considering atmospheric propagation delay, and compares the advantages and disadvantages with classical methods. According to the pulse-width and bandwidth of radar signal, the geometric calibration scheme is determined, and the time-varying atmospheric propagation delay is eliminated by using the global atmospheric environment reference data. Then, based on the slant range imaging characteristics of spaceborne SAR, a cross geometric calibration method is proposed based on the constraint of the same name point. With the same incidence angle, the projection difference caused by elevation error can be eliminated, and the high-precision calibration of spaceborne SAR system can be realized without high-precision ground control data.

(4) The geometric positioning accuracy of domestic SAR satellite is analyzed and verified.

Taking the Yaogan-13 satellite and Gaofen-3 satellite as an example, this paper carries out a series of experiment and analysis for the proposed two geometric calibration methods by using the normalization calibration equipment placed in Songshan Remote Sensing Satellite Calibration Field. Combined with the ground control data in Taiyuan Shanxi, Xianning Hebei, Anping Hubei, Tianjin and other regions, the geometric positioning accuracy of YG-13 after calibration is verified without control points. By using the RPC model, which is constructed by the virtual re-imaging method, the correctness and effectiveness of the proposed algorithm are verified by evaluating the plane and height accuracy of Yaogan-7 satellite.

Key Words: spaceborne SAR; geometric calibration; multimode hybrid geometric calibration; cross geometric calibration; automatic corner reflector

目 录

摘要	I
Abstract	III
1 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 星载 SAR 几何模型研究现状	4
1.2.2 星载 SAR 影像控制点获取研究现状	6
1.2.3 星载 SAR 几何定标研究现状	8
1.3 主要研究内容及技术路线	9
1.4 论文组织结构	11
2 星载 SAR 几何模型	12
2.1 星载 SAR 几何定位误差分析	12
2.1.1 传感器误差对几何定位的影响	12
2.1.2 目标定位误差对几何定位的影响	14
2.1.3 平台星历误差对几何定位的影响	16
2.1.4 目标测距误差对几何定位的影响	17
2.2 星载 SAR 几何定位模型构建与改进	19
2.2.1 RD 定位模型与改进的数值解法	19
2.2.2 RPC 定位模型与虚拟重成像	29
2.3 大气传播延迟改正模型	35
2.3.1 对流层大气传播延迟改正模型	36
2.3.2 电离层大气传播延迟改正模型	36
2.4 基于 RPC 模型的星载 SAR 平差模型	38
2.5 实验与分析	41
2.5.1 RPC 模型拟合精度分析	41
2.5.2 大气传播延迟影响分析	44
2.6 本章小结	50

3 星载 SAR 影像高精度控制点获取	51
3.1 高精度角反射器点获取方法	51
3.1.1 自动角反射器设备设计	51
3.1.2 高精度角反射器点像素坐标提取算法	60
3.2 基于光学遥感影像的控制点获取	65
3.3 固体潮改正	66
3.4 实验与分析	68
3.4.1 基于点目标仿真的角反射器点提取精度分析	68
3.4.2 基于实测数据的角反射器点提取精度分析	71
3.5 本章小结	73
4 高精度星载 SAR 几何定标方法	74
4.1 经典几何定标方法	74
4.2 顾及大气传播延迟的多模式混合几何定标	75
4.2.1 基于大气传播延迟改正的几何定标模型	76
4.2.2 星载 SAR 几何定标参数解算	78
4.2.3 多模式混合几何定标方法	79
4.2.4 星载 SAR 几何定标精度分析	81
4.3 基于同名点约束的交叉几何定标	83
4.3.1 交叉几何定标机理	83
4.3.2 交叉几何定标模型与求解	86
4.4 实验与分析	88
4.4.1 时宽带宽组合和大气传播延迟对几何定标的影响	88
4.4.2 入射角差异对交叉几何定标的影响	91
4.5 本章小结	94
5 星载 SAR 几何定标方法在国产 SAR 卫星中的应用	95
5.1 国产 SAR 卫星实验数据	95
5.1.1 星载 SAR 影像数据	95
5.1.2 控制点数据	99
5.2 YG-13 号几何定标与精度验证	101

5.2.1 几何定标精度分析与精度验证	101
5.2.2 控制点数量对几何定标精度的影响分析	104
5.3 GF-3 号几何定标与精度验证	105
5.3.1 大气传播延迟影响分析	105
5.3.2 控制点精度分析	106
5.3.3 几何定标结果分析	107
5.4 YG-13 号与 GF-3 号的交叉几何定标与精度验证	110
5.4.1 同名点定位精度分析	111
5.4.2 入射角差异影响分析	112
5.4.3 交叉几何定标结果分析	112
5.5 平面与立体精度评价	114
5.5.1 平面定位精度评价	114
5.5.2 立体定位精度评价	117
5.6 本章小结	124
6 结论与展望	125
6.1 结论	125
6.2 下一步工作展望	127
参 考 文 献	128
作 者 简 历	139
学位论文数据集	142

1 绪论

1.1 研究背景与意义

空间技术及其应用的发展既可以推动军民深度融合，也可以有效推进国家“一带一路”建设工作，是国家高新技术与综合国力的重要标志。航天遥感技术是推动地球空间信息化的主力军，既是动态监测国土资源环境信息的有效手段，也是准确把握瞬息万变的复杂战场态势信息的首选技术，将对我国测绘地理信息产业的发展产生深刻的影响，也在一定意义上已经成为决定战争胜负和影响国家安全的重要因素^[1]。

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)遥感在光学遥感图像无法获取的情况下，可以替代光学遥感进行探测，就可以弥补由于光学遥感缺失而造成的地理信息缺失。虽然采用光学遥感方法可以快速实现对大范围区域的监测，但是光学遥感方法主要依赖于太阳光照进行成像，并且复杂多变的天气条件也制约着光学遥感方法成像，因此光学遥感手段只能在天气状况良好的情况下获得清晰的遥感影像，难以实现全天时、全天候的监测。红外遥感虽然能够实现对目标的全天时监测，但定位精度不高^[2]。相比之下，通过雷达手段获取遥感影像较少受到上述外部条件的限制，且雷达波长相比可见光长，可以穿透浅层地表和植被^[3]，进而可以获取光学遥感手段难以获取的信息。因此，SAR 图像在地形测绘^[4]、形变监测^[5]、资源勘查^[6]、农作物调查估产^[7]、森林调查^[8]、海洋环境监测^[9]、大气与环境调查^[10]、行星成像探测^[11]、防灾减灾应急处理^[12]、军事目标快速检测与定位^[13]等领域发挥着巨大作用。

相对于机载 SAR 平台而言，星载 SAR 具有覆盖范围广、活动空间大、不受国界领空限制的独特优势，受到世界各国重视。从 1978 年美国发射第一颗合成孔径雷达卫星——海洋卫星^[14]（SEASAT-A）开始，很多国家都在大力开展星载 SAR 卫星的研究。其中，典型的早期成像雷达系统主要有日本的 JERS-1^[15]，欧空局的 ERS-1/2^[16, 17]，加拿大的 Radarsat-1^[18]等，都属于单极化、单波段的星载 SAR 系统。由于早期星载 SAR 影像的分辨率比较低，难以进行大比例尺测图和地物目标的精确判读，严重制约了星载 SAR 影像数据的广泛应用。随着国际上电子和计算机等技术的不断发展，星载 SAR 系统也从早期的单极化、单波段、单模式、固定入射角等模式和功能逐渐向多极化、多波段、多模式、可变入射角等全方位发展。国际上典型的星载 SAR 系统及其参数如表 1.1 所示^[19-33]。随着日本 7m 分辨率的 ALOS-PALSAR、加拿大 1m 分辨率的 Radarsat-2、意大利 1m 分辨率

的 Cosmo-SkyMed、日本 1m 分辨率的 ALOS-2 以及德国 1m 分辨率的 TerraSAR-X 和 TanDEM-X 等 SAR 卫星的相继成功发射，标志着高分辨率星载 SAR 时代的到来。

表 1.1 国际上典型的星载 SAR 系统及其参数

Tab. 1.1 Typical spaceborne SAR systems and parameters in the world

SAR 系统	国际/组织	发射时间	波段	极化方式	分辨率/m	定位精度/m
Lacrosse	美国	1988/1991/ 1997/2000/ 2005	X/L	双极化	0.3~3	—
JERS-1	日本	1992	L	单极化	18	111
ERS-1/2	欧空局	1991/1995	C	单极化	30	—
Radarsat-1	加拿大	1995	C	单极化	8~100	0~550
Cassini	美国	1997	Ku	单极化	600~2100	—
SRTM	美国	2000	C/X	多极化	30/90	20(H)/16(V)
ENVISAT-1	欧空局	2002	C	多极化	30/150	—
LightSAR	美国	2002	L	多极化	3~100	—
ALOS-PALSAR	日本	2006	L	多极化	7~100	—
RADARSAT-2	加拿大	2007	C	多极化	1~100	10~20
COSMO-SkyMed	意大利	2007/2007/ 2008/2010	X	多极化	1~100	15
TerraSAR-X/ TanDEM-X	德国	2007/2010	X	多极化	1~16	2
ALOS-2	日本	2014	L	多极化	1~100	—
Sentinel-1	欧空局	2014	C	双极化	5~40	8

我国自 20 世纪 70 年代就已经开展 SAR 对地观测技术的研究，相关技术研究也取得了重大进展。70 年代末，我国第一台由中国科学院电子学研究所(Insititute of Electrics, Chinese Academy of Sciences, IECAS)研制的机载 SAR 系统在云南省腾冲市成功进行了对地观测试验^[34]，随后机载 SAR 进入研究热潮。相比国产机载 SAR 系统的成熟发展，国内对星载 SAR 系统的研究相对滞后。经过国产星载 SAR 关键技术攻关后，我国 SAR 遥感卫星陆续成功发射。从 2006 年到 2015 年，由上海航天技术研究院制造的 8 颗遥感系列卫星陆续成功进入预定轨道，地面分辨率均优于 5 米，最高可实现优于亚米级，主要用于开展科学试验、国土资源普查、农作物估产和防灾减灾等领域。2012 年 11 月 19 日，“环境一号” C (HJ-1C) 卫星在太原卫星发射中心搭载长征二号丙运载火箭成功进入预定轨

道。HJ-1C 卫星是中国第一颗 S 波段的太阳同步轨道 SAR 卫星，其轨道高度为 500 公里、降交点地方时为上午 6 时，其搭载的雷达系统具有条带和扫描两种工作模式，成像带宽度分别为 40 公里和 100 公里，空间分辨率最高可达 5 米^[35]。2016 年 8 月 10 日，由中国航天科技集团公司所属空间技术研究院研制的高分三号卫星在太原卫星发射中心搭载长征四号丙运载火箭成功进入预定轨道，是我国第一颗分辨率达到 1 米的 C 频段多极化 SAR 卫星。高分三号与 RadarSat-2 相似，具有包括传统条带成像模式和扫描成像模式以及面向海洋应用的波成像模式和全球观测成像模式在内的 12 种成像模式，是目前世界上成像模式最多的一颗 SAR 卫星^[36]。综上，我国已经有 10 余颗星载 SAR 卫星，覆盖 L、S、C、X 等四个频段，具有多种极化方式，分辨率最高可实现亚米级，采用条带、聚束和扫描等多种成像模式。由此可见，我国的星载 SAR 载荷发展日趋成熟。

随着我国高分辨率 SAR 卫星的陆续发射，通过卫星组网方式，可实现快速获取全球区域的高分辨率 SAR 影像数据。虽然我国星载 SAR 影像分辨率和辐射质量的不断得到提升，逐渐解决了国产 SAR 卫星“看不清”的问题，但是大部分国产 SAR 卫星影像数据仍未得到充分的有效利用，造成了大量的国产 SAR 卫星数据浪费。由此说明，一味追求高分辨率、高辐射质量仍难以满足大区域影像获取等遥感应用的需求，“测不准”的问题日益凸显，因此国产 SAR 卫星影像的几何质量提升成为我国遥感卫星现阶段发展的重要研究方向。由于缺少基础性研究以及卫星硬件等的限制，国内 SAR 卫星影像定位精度与国外的差距相差较大。我国大部分 SAR 卫星几何定位精度的设计指标均在几百米左右，尽管经过在轨测试几何定标后，部分 SAR 卫星的无控制点几何定位精度最高可达 100m。即使 2016 年刚成功发射的高分辨率 SAR 卫星——高分三号，几何定标后的无控定位精度仅优于 50m。无控制点几何定位精度是遥感卫星几何性能的体现，说明国产 SAR 卫星的硬件水平和发达国家存在差距。并且依赖传统的几何定标方法，无法满足我国高分辨率 SAR 卫星的应用需求。因此，需要通过“以软补硬”^[37]的方法，研究高精度的国产星载 SAR 几何定标理论与方法，也是解决国产 SAR 卫星几何质量、拓宽国产 SAR 卫星数据应用的有效手段。

1.2 国内外研究现状

几何定标是星载 SAR 系统在轨测试期间一项重要工作，使星载 SAR 系统的几何精度达到最优，也是影响 SAR 影像数据后续应用的关键因素。然而，影响几何定标结果的主要影响因素有星载 SAR 几何模型的构建、控制点的获取以及几何定标方法的确定。

1.2.1 星载 SAR 几何模型研究现状

星载 SAR 系统的几何定位模型主要建立了地面目标点的三维空间坐标与相应像点的像平面二维坐标之间的数学关系，是星载 SAR 几何处理的基础。从模型构建形式的角度，星载 SAR 几何定位模型通常可分为：严密几何模型和通用几何模型。

(1) 严密几何模型

严密几何模型根据 SAR 系统成像特性，主要采用距离方程和多普勒方程，具有严密的物理意义。1981 年，Brown 最早利用星载 SAR 数据的距离和多普勒参数以及卫星星历数据对地面目标的三维坐标进行解算，提出了距离多普勒（Range Doppler, RD）定位模型^[38]；Curlander 在 Brown 的基础上提出了 3 个基本方程式，发展了 RD 定位模型，但并未给出具体的 RD 定位模型解算方法^[39]。后期一直没有关于 RD 定位模型解算方法的文献报道。直到 1992 年，Wivell 等首次提出了 RD 定位模型的解算方法^[40]；随后，美国阿拉斯加卫星设备地球物理研究所（Alaska SAR Facility, ASF）在其网站上提出了一种 RD 定位模型的迭代求解方法（即 ASF 算法）。

针对 RD 定位模型解算方法，我国专家学者也开展了一些研究工作。袁孝康利用卫星星历表和雷达回波的距离多普勒参数，基于 RD 模型推导了目标定位的解析求解算法，不需要再星载 SAR 的视场中使用已知的参考点，并且与卫星姿态无关^[41-44]；周金萍等将 ASF 算法引入国内^[45, 46]，陈尔学等发展了 ASF 数值解法，提出了分析法与迭代法相结合的直接定位算法（Analysis and Iterating Routes based Geolocation Method, AIRGM）^[47]；张永红等利用 RD 定位模型的最小二乘解算方法，用于星载 SAR 的几何校正与正射校正^[48, 49]；杨杰等基于数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM）研究了 RD 定位模型的求解方法，有效提升了几何定位精度^[50]；傅文学等将目标点大地高归算至地球赤道半径对 RD 模型中的地球椭球方程进行修正，提升了高纬度和高海波地区的定位精度^[51]；魏钜杰等通过线性化及最小二乘平差原理迭代求解 RD 定位模型，并基于 AIRGM 算法和低分辨率 DEM 提出了一种由粗到精的 SAR 影像直接地理定位方法^[52, 53]；刘佳音等利用一元四次方程求根方法，推导出 RD 定位模型的明确数学解析解^[54]。

另外，国际上 SEASAT、SIR-C/X、JERS、RADARSAT-1/2、ERS-1/2、ENVISAT ASAR 等都可以利用 RD 模型进行地理定位，可见对星载 SAR 的几何模型采用 RD 模型是主流。

(2) 通用几何模型

通用几何模型中常见的为有理多项式系数（Rational Polynomial Coefficients, RPC）模型。RPC 模型适用于不同类型的传感器，无需了解传感器的成像过程和系统特性等参数，

相比严密几何模型（RD 模型）而言，它可以便于快速进行摄影测量处理，而且应用上无需考虑新型传感器部分参数的改变，使用方便。

如今，RPC 模型已广泛应用于光学卫星遥感数据处理^[55]，但其在 SAR 数据中的应用较少。RADARSAT-2 在星载 SAR 影像中首次提供 RPC 参数^[56]，是 RPC 模型所对应的参数，这无疑将 RPC 模型在星载光学影像中的应用扩展到了 SAR 领域。同样的，RPC 模型自身的特性，与 SAR 数据的用户不希望了解复杂的卫星参数的现实情况以及 SAR 商业软件的实时计算的要求相适应。研究 RPC 模型在 SAR 各级产品中的应用将简化 SAR 处理的软件模块的开发（不需要为不同的传感器数据建立不同的处理模块）。目前，很多在轨运行的光学遥感卫星均提供 RPC 模型的参数文件（如 IKONOS、QUIKCBIRD、资源三号等），大大方便了用户的使用；研究 RPC 模型在 SAR 数据处理中的应用，有益于促进 SAR 产品的广泛应用。同时，RPC 模型在高分辨率星载 SAR 处理中的应用正逐渐引起国内外学者的兴趣。

与光学卫星影像不同，SAR 的几何定位精度与姿态无关，特别是近来新一代的 SAR 卫星的成功发射，其高分辨率的优势使得轨道和校正时间的不确定因素大大减小。然而，光学遥感卫星影像的几何定位精度受姿态扰动等因素影响较大。因此，相比而言，RPC 模型更加适合用于星载 SAR 影像的几何处理。目前，已有专家学者在 RPC 模型替代星载 SAR 影像的严密成像几何模型方面进行了相关研究和分析。张过等采用高分辨率的 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 卫星对比了推扫式卫星影像与 SAR 影像成像的几何特征，由像点位移的理论出发指出距离投影能够以一定的方式转换成中心投影，对比了光学影像共线方程与 SAR 影像距离多普勒模型的方程形式，并用泰勒公式对距离方程展开，在理论上首次证明了 RPC 模型能够替代星载 SAR 影像的严密几何模型，并采用多类型星载 SAR 数据进行验证，对不同分辨率的 SAR 影像，RPC 模型的拟合精度均可以优于 5% 像素^[57-59]；秦绪文等提出了无需初始值的 RPC 模型参数的解算方法^[60, 61]；Eftekhari 等提出了基于传感器参数修正的 RPC 模型解算方法^[62]。

随着 RPC 模型的成熟发展，RPC 模型得到了广泛应用。张过等从星载 SAR 立体平差和星载 SAR 正射纠正两个方面验证了仿射变换模型+距离多普勒方程的 RPC 模型可以进行星载 SAR 的摄影测量处理，RPC 模型可以替代 RD 模型进行高分辨率 SAR 影像的正射纠正，并且正射纠正的精度与理论精度相当，并且提高了星载 SAR 正射纠正的处理速度^[63-67]；刘军等、Huang 等和 Capaldo 等基于 RPC 模型开展了立体定位算法和区域网平差方法研究^[68-71]；Zhang 等在 InSAR 处理中，基于 RPC 模型利用相位估计替代基线估计，补偿了因轨道引起的误差，并重建真实的相位^[72, 73]；Zhang 等提出了基于 SAR 仿真和影像匹

配的精化 RPC 模型，来提高绝对定位精度的能力^[74]；Wu 等利用基于光束法平差的 RPC 模型解决多传感器的星载 SAR 影像的同时定位的问题^[75]；Sekhar 等利用基于平移误差补偿修正的 RPC 模型、基于平移误差补偿重生成的 RPC 模型和基于仿射变换模型重生成的 RPC 模型，分别对中等分辨率 SAR 影像——RISAT-1 数据进行了正射纠正，并对比分析了几何质量^[76]。但是，以上相关研究都是在正侧视模式、零多普勒条件下利用 RPC 模型替代距离多普勒模型进行的相关分析和研究，然而在斜视模式、非零多普勒频率条件下，多普勒中心频率随距离的变化较大，多普勒中心频率的变化幅度在 1000Hz 左右^[77]，将会引起几何模型精度等问题。

1.2.2 星载 SAR 影像控制点获取研究现状

星载 SAR 影像控制点获取是几何定标的重要环节，其获取精度直接影响几何定标精度。相比于普通散射目标，雷达信号从任一方向入射角反射器后，多次反射后均可沿入射方向反射到 SAR 系统。由此，在 SAR 图像上形成很强的亮度区，比较容易精确获取“亮点”中心，可实现高精度定位，通常被用于 SAR 影像的高精度地面控制点。

(1) 人工角反射器

德国地学研究中心 (German Research Centre for Geosciences, GFZ) 的夏耶和 Rigber 等人最早利用人工角反射器方法进行了地面微小形变监测的实验分析与应用研究^[78, 79]。由此，国内外的专家学者将人工角反射器技术广泛应用于 SAR 系统的几何和辐射定标、SAR 影像几何相关处理、地表沉降和滑坡监测等多个领域。2010 年，Biancardi 和 Aria 等主要结合角反射器、异频雷达收发机和 SAR 图像稳定目标点，采用永久散射体 (Permanent Scatterer, PS) 定标方法进行几何和辐射定标^[80, 81]；2010 年，Bu 等利用人工角反射器估计 SAR 影像的点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 用于 SAR 图像复原试验中，复原后 SAR 图像质量得到了提高^[82]；2013 年，Yu 等基于 TerraSAR-X 利用永久散射体干涉测量的方法进行地表沉降监测，通过数值分析验证了角反射器比自然永久散射体的雷达反射性能强^[83]；2014 年，Fan 等根据人工角反射器干涉测量技术 (Corner Reflector Interferometric Synthetic Aperture Radar, CR-InSAR) 方法，利用人工角反射器进行了秭归县范家坪滑坡监测^[84]。

相比于普通散射目标，人工角反射器在 SAR 图像上形成很强的亮度区，同时 CR-InSAR 技术在很大程度上解决了时间失相干因素和大气效应这两个难题，所以人工角反射器技术具有巨大的应用潜力^[85]，尤其是在 SAR 卫星的几何定标中。目前，国内外多数 SAR 卫星（如 COSMO-SkyMed^[86]、TerraSAR-X^[28]等）的定标工作均通过人工布设角反射器或

有源定标器的方式进行。但是，利用人工角反射器对 SAR 卫星进行定标工作，不能满足自动化、常态化的需求，只是在卫星发射后依靠大量人力和物力布设人工角反射器来完成在轨定标工作，而在卫星的日常运行中极少开展 SAR 卫星系统性能的长期监测、周期性定标和更新定标参数等业务化运行工作。随着 SAR 卫星长时间在轨运行，SAR 载荷等硬件老化、各项性能降低，将对 SAR 影像的长期应用及深度拓展产生影响。因此，对自动化、常态化的 SAR 系统状态监测和周期性的定标需求越来越迫切。

(2) 控制点提取

控制点坐标的精度直接影响 SAR 几何定标精度，因此高精度控制点提取是几何定标技术的重要内容。国内外学者针对 SAR 影像控制点提取做了大量研究。熊文秀等根据干涉相位各个成分的空间特性，分离出噪声相位判别点的质量，提出了顾及时空特性的小基线集技术（Small Baseline Subset Technology, SBAS）高质量点选取算法^[87]；王磊等提出了一种基于区域特征提取的 SAR 图像和光学图像配准方法^[88]；张登荣提出了基于面特征的匹配方法，实现光学和 SAR 影像间的自动且高精度匹配控制点^[89]；许金萍等从地面控制点（Ground Control Point, GCP）库中调出已有的图像，通过自动匹配算法实现控制点的自动获取^[90]；任芙蓉通过 DEM 模拟出一幅 SAR 图像，利用模拟图像与真实图像的匹配来提取控制点^[91]；李莹莹等提出一种高分辨率 SAR 图像与光学图像之间的自动配准方法，使用边缘检测算子分别对光学图像和 SAR 图像进行特征提取，基于归一化互相关原理进行图像之间的同名点精匹配^[92]。以上研究均是通过 SAR 影像与光学影像的配准或者匹配方式获得控制点。对于 SAR 影像间的匹配获得控制点，许可乐等提出了基于多尺度 Gabor 滤波器组及对比度双门限特征点精化的 SAR 图像特征点提取方法^[93]；王山虎等利用尺度不变特征转换（Scal-invariant Feature Transform, SIFT）在大尺度上检测并描述特征，提出了一种新的基于各向异性尺度空间的同名点提取方法^[94]；姜丽敏等利用 SIFT 实现不变特征检测，结合干涉优化准则采用三重约束的筛选法提取同名点^[95]。然而，这些都是基于影像间地物特征一致性来获取控制点，精度会受到 SAR 图像质量、图像间的地物信息一致性和匹配算法等因素影响。

对于星载 SAR 几何定标来说，通常采用能够在 SAR 影像上准确提取点中心坐标的角反射器作为控制点。薛笑荣等通过对角反射器点目标图像进行模拟，利用模式匹配方法进行角反射器点的提取，采用湖北新滩的 SAR 影像进行了角反射器点检测的实验^[96]；闫世勇在 SAR 图像上利用目视判读和计算机自动识别方法有效识别出了人工角反射器点^[97]；邢学敏等以角反射器点强度与相关系数综合评定指数为标准，选择评定指数最大的点为最终目标角反射器点位置^[98]。对于 SAR 影像中角反射器点提取的研究较少，以上研究均未

从角反射器点的成像特性进行精确提取角反射器点的中心坐标，并且未对点提取精度进行评价，仅是从目视效果来证明了其算法的有效性。

针对单张影像上提取控制点，星点与角反射器点在影像上成像效果相似，故提取算法也是相似的。亚像元内插定位时最普遍的点状图像定位方法，亚像元精度的点提取方法主要有：质心法、中值法、曲线拟合法等^[99]。Saloman 等在星敏感器中采用质心法，窗口像元为 4×4 ，精度可以达到 1/16 像元^[100]；Stanton 等研究了 ASRTOS 星敏感器的修正质心法，通过标定方法提高了亚像元精度^[101-103]；胡晓东等利用高斯点分布函数为数学模型，提出了一种能够获取高精度星点质心位置的、基于帧累加的星点质心提取方法，当迭代次数达到 100 次时，平均定位精度可达 0.1 像素^[104]。由此，可以将高精度的星点提取方法（如质心法）应用于 SAR 影像的角反射器点精确提取。

1.2.3 星载 SAR 几何定标研究现状

星载 SAR 几何定标主要通过地面布设的角反射器点对星载 SAR 的系统误差进行标定、补偿，提高星载 SAR 影像在无控制点情况下的几何定位精度。

近年来，随着 SAR 卫星定位模型的发展和大量高分辨率 SAR 卫星的发射，国外很多研究机构和科研人员都开展了大量的辐射和几何定标工作。如德国宇航中心（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR）的 Bräutigam、Schwerdt 等人对 TerraSAR-X 卫星的辐射和几何定标进行的工作，在几何定标方面主要分析了系统方位向延迟和设备内部的电子延迟等^[105-107]；瑞士苏黎世大学遥感中心的 Schubert、Jehle、Small、Meier、Kosmann 等人对 ASAR、TerraSAR-X 等卫星大气路径延迟影响的分析等^[108, 109]；Calabrese、Cricenti、Grimani、Scaranari、Falzini 等人对 COSMO-SKYMED 系统误差的研究等^[110]；Small、Toutin、Chénier 等人对 RADARSAT 几何定标的研究^[111]；Mohr、Madsen 和 Small 等人对欧空局（European Space Agency, ERS）卫星各关键参数的定标工作的研究^[112]等。

经典的星载 SAR 几何定标主要是针对方位向起始时间和距离向起始斜距两个参数进行标定^[28]。欧洲发射的 ERS 卫星是最早且最广泛成功应用的国际先进 SAR 卫星之一，其最早实现了高精度的几何定标。ERS 卫星发射后，欧盟成立专门的部门，采用几何分析定标的方法，利用地面定标场对 ERS 卫星影像进行几何定标处理，最终单片无控制点平面定位精度达到 20m（Root Mean Square, RMS）。2007 年以后发射的国外 SAR 卫星如 TerraSAR-X、ALOS-PALSAR、Sentinel-1A、RADARSAT-2 等经几何定标后的无控定位精度均优于 10 米^[27, 29, 30, 112-115]，ASAR 的距离向定位精度优于 0.6 个像素，而方位向优于 8 个像素^[116]。虽然国外 SAR 卫星通过经典的几何定标后均可实现较理想的无控定位精度，

但是均未充分考虑影响 SAR 卫星几何定标的误差源，仅仅从升降轨、不同波位（即不同入射角）等方面对几何定标结果进行分析。尽管 TerraSAR-X 和 Sentinel-1A 的几何定标考虑了简单的大气传播延迟对斜距测量的影响，但补偿参数后斜距存在 2-3 米的残差，均认为几何定标精度与入射角有关^[29, 30, 113, 115]。

在我国，尽管 863 计划支持了星载 SAR 在农林、水资源、矿产、海洋等方面的应用研究，但总的说来，我国星载 SAR 应用研究比较晚，整体应用水平还比较低。因此，跟踪国际先进水平，开展我国星载 SAR 应用研究，特别是为我国自行研制的星载 SAR 做技术储备，是摆在广大微波遥感科技工作者面前的艰巨任务。由于国内民用的 SAR 卫星极少，所以对星载 SAR 的几何定标研究主要利用国外星载 SAR 数据开展。张过等人利用遥感 1 号数据，选择距离向初始时间延迟测量误差、距离向采样率误差、方向初始时间误差、方位向脉冲重复频率误差作为定标参数，通过定标处理，现在提高了影像定位精度^[117]。2013 年，北京大学周晓等利用了 22 个角反射器，在中国东北的内蒙古地区，开展了对 RADARSAT-2、TerraSAR-X 数据的几何定标试验，他们选择了初始斜距、距离向分辨率、方位向时间作为定标参数，改善了影像定位精度^[118-120]。但是针对国产星载 SAR 系统的定标研究还未见诸文献资料，因此需要发展较为系统的星载 SAR 几何定标算法，应对已经发射和即将发射的国产高分辨率卫星影像高精度几何定标和几何定位的需求。

1.3 主要研究内容及技术路线

国产 SAR 卫星几何定位精度差，严重影响了国产高分辨率 SAR 卫星影像的后续广泛应用。因此，本文将从星载 SAR 几何模型、控制点获取和几何定标方法三个方面，重点研究国产 SAR 卫星高精度几何定标理论与方法，改善国产高分辨率 SAR 卫星影像的几何定标精度，提升国产 SAR 卫星影像的应用效果。论文研究内容的相互关系与技术路线图如图 1.1 所示。

根据论文逻辑结构图可知，本文研究思路是以理论和方法研究为基础，结合实例数据进行实验验证，主要研究内容如下：

(1) 星载 SAR 几何模型构建

针对单基 SAR 卫星的条带、聚束和扫描模式，本文将详细分析星载 SAR 几何定位误差影响因素，构建高精度星载 SAR 几何定位模型和顾及大气传播延迟的星载 SAR 几何定标模型，研究一种改进的 RD 模型数值解法和通用几何模型拟合精度提升方法。

(2) 高精度控制点获取

控制点获取是“以软补硬”得以实施的关键技术环节，为了满足多颗 SAR 卫星常态化和高精度几何定标的需求，本文将研究一种高精度自动角反射器设备以及角反射器点的高精度提取算法。

(3) 高精度星载 SAR 几何定标方法

针对经典的星载 SAR 几何方法难以满足国产高分辨率星载 SAR 卫星的需求，本文将从雷达信号特性与几何定位精度之间的关系出发，研究一种顾忌大气传播延迟的星载 SAR 卫星多模式混合几何定标方法；基于 SAR 系统的斜距成像特性，研究一种基于同名点约束的交叉几何定标方法，打破星载 SAR 几何定标对高精度地面控制数据的严重依赖。

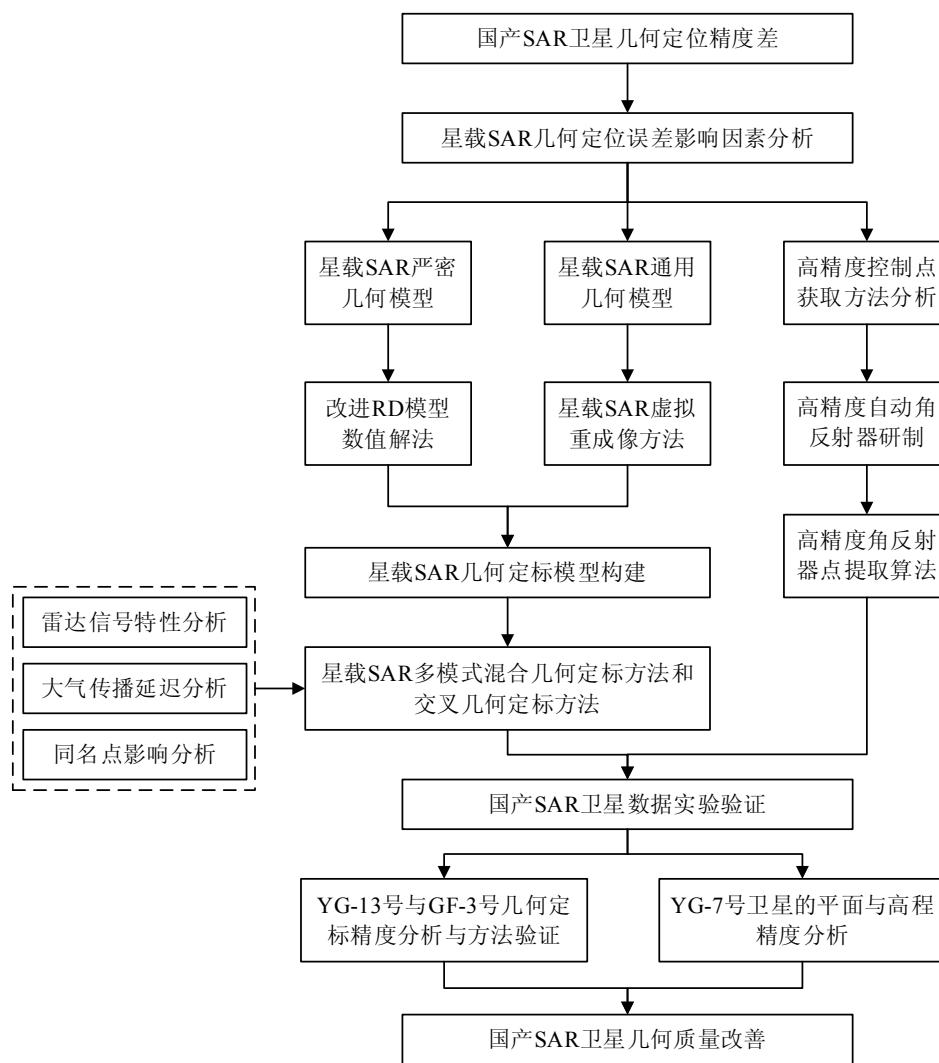


图 1.1 论文技术路线图

Fig. 1.1 Technical roadmap of thesis

(4) 国产 SAR 卫星几何定标与精度评价实验

以国产 SAR 卫星数据为实例，针对提出的几何定标方法，本文将利用中国嵩山遥感卫星定标场的常态化定标设备进行实验和分析，并结合山西太原、河北安平、湖北咸宁、天津等地区的地面控制数据验证定标后的无控几何定位精度。同时，本文将利用虚拟重成像方法构建的 RPC 模型，对国产 SAR 卫星影像的平面和高程精度进行评价，验证所提出算法的正确性和有效性。

1.4 论文组织结构

基于上述研究内容，本文具体内容安排如下：

第一章：绪论。介绍了本文的研究背景与意义、当前国内外星载 SAR 几何模型、控制点获取和几何定标的研究现状，在此基础上提出了本文的研究内容。

第二章：星载 SAR 几何模型构建。本章详细分析了星载 SAR 几何定位误差影响因素，构建了星载 SAR 卫星严密几何模型和通用几何模型，提出了一种改进的 RD 模型数值解法，研究星载 SAR 卫星的虚拟重成像方法，提升了 RPC 模型的拟合精度。

第三章：高精度控制点获取。以角反射器点作为 SAR 影像的控制点，提出了一种常态化、高精度的自动角反射器设备研制方法，研究了高精度提取角反射器点的方法。针对无法拍摄几何定标场区域的星载 SAR 影像，提出了一种基于光学遥感影像的控制点获取方法，有效补充了星载 SAR 影像控制点的获取手段。

第四章：高精度星载 SAR 几何定标方法。总结了国内外学者研究的经典几何定标方法，通过考虑大气传播延迟的影响，构建了高精度星载 SAR 几何定标模型，并从雷达信号特性与几何定位精度之间的关系出发，提出了一种顾忌大气传播延迟的星载 SAR 卫星多模式混合几何定标方法。基于 SAR 系统的斜距成像特性，研究一种基于同名点约束的交叉几何定标方法，解决在无地面控制数据的情况下仍可实现星载 SAR 高精度几何定标。

第五章：实验与分析。以遥感 13 号卫星和高分三号卫星为例，针对提出的几何定标方法，利用中国嵩山遥感卫星定标场的常态化定标设备进行了实验和分析，并结合山西太原、河北安平、湖北咸宁、天津等地区的地面控制数据验证了定标后的无控几何定位精度。利用本文利用虚拟重成像方法构建的 RPC 模型，对遥感 7 号卫星影像的平面和立体定位精度，验证了所提出算法的正确性和有效性。

第六章：总结与展望。对论文所做的贡献与创新进行总结，并对未来进一步的研究内容进行展望。

2 星载 SAR 几何模型

星载 SAR 几何定位模型描述的是像点位置与相应地面点位置之间的数学关系，而星载 SAR 几何定标模型描述的是 SAR 卫星系统误差参数与星载 SAR 几何定位模型参数之间的数学关系。本章首先详细分析星载 SAR 几何定位误差影响因素，然后构建星载 SAR 卫星严密几何模型和通用几何模型，提出一种改进的 RD 模型数值解法，研究星载 SAR 卫星的虚拟重成像方法，提升了 RPC 模型的拟合精度。

2.1 星载 SAR 几何定位误差分析

影响星载 SAR 几何定位精度的主要因素有：传感器不稳定、平台不稳定、信号传播影响、地形高度和处理器引起的误差^[12]。可以归为以下四种误差类型：传感器误差、目标定位误差、平台星历误差和目标测距误差。

2.1.1 传感器误差对几何定位的影响

传感器稳定性是控制 SAR 影像数据内部几何保真度的一个重要因素。影响传感器稳定性的主要有三个因素：本地振荡器漂移和传感器电子时延和航天器时钟漂移。

(1) 本地振荡器漂移

发送至脉冲发射源和模拟数字转换器（Analog-to-Digital Converter, ADC）的定时信号精度限制了脉冲间或者采样间周期的一致性，而这些定时信号的变化主要依赖于本地振荡器的稳定性。通常来说，从一幅影像的几何保真度来看，短周期本地振荡频率变化引起的时钟抖动是可以忽略的。但是，本地振荡器的长期漂移将会引起脉冲重复频率（Pulse Repetition Frequency, PRF）的变化，进而影响沿轨向（也就是方位向）像素间隔的大小，即，

$$\delta x_{az} = LV_{sw} / f_p \quad (2.3)$$

式中， L 为方位向视数， f_p 为 PRF， V_{sw} 为扫描带速度。 V_{sw} 可以表示为，

$$V_{sw} = \left| \frac{R_t}{R_s} V_s - V_t \right| \quad (2.4)$$

式中， R_s 和 V_s 、 R_t 和 V_t 分别是传感器和目标的位置与速度矢量。

由此可知，本地振荡器漂移引起的误差是一个沿轨方向的比例误差。

(2) 传感器电子时延

雷达信号经过发射机和接收机时，会产生信号的电子时延，直接影响 SAR 影像的几何保真度。在计算斜距时，应当从总的信号延时中减去这个传感器电子时延 τ_e ，得到的才是真实的信号传播时间，即，

$$R = c(\tau - \tau_e)/2 \quad (2.5)$$

式中， τ 为雷达信号从脉冲信号的产生到 ADC 采样所经历的总延时， c 为光速。通过本地振荡频率对雷达计时单元的循环控制，可以准确地获得这个总延时 τ 。雷达信号传播时间的估计误差导致斜距存在误差，进而引起入射角估计存在偏差。根据下图示意图，可以得到，

$$\eta = \sin^{-1}(R_s \sin \gamma / R_t) \quad (2.6)$$

式中， η 为入射角， γ 为视角。视角 γ 可以三角函数关系获得，即，

$$\gamma = \cos^{-1}[(R^2 + R_s^2 - R_t^2)/(2RR_s)] \quad (2.7)$$

式中， R 为传感器到目标点间的斜距。由式(2.6)和式(2.7)可知，斜距的估计误差将会导致入射角的估计存在偏差。

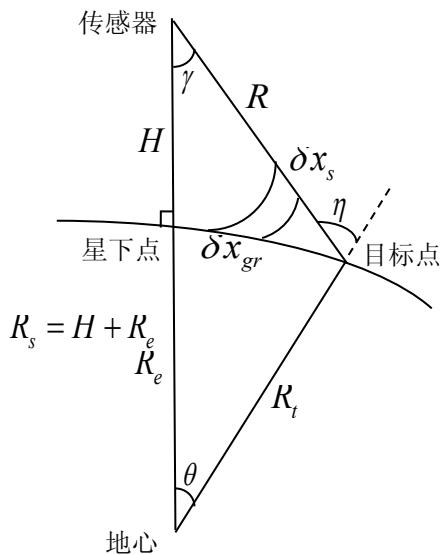


图 2.1 视角与入射角的相对关系

Fig. 2.1 Relationship between look angle and incidence angle

在 SAR 影像中，地距像素间隔可以表示为，

$$\delta x_{gr} = c / (2f_s \sin \eta) \quad (2.8)$$

式中, f_s 是采样频率。从式(2.8)中可以看出, 视角 γ 的误差或者采样频率 f_s 的误差均会在垂轨方向(距离向)上产生一个比例误差。

(3) 航天器时钟漂移

如果航天器时钟与记录星历数据的时钟之间存在偏差, 那么将会导致目标定位误差。如果卫星星历是在惯性坐标系下的, 那么实际获取的数据与惯性坐标系下的参考时间之间存在时间差值, 将会导致地球产生一个自转量。因此, 航天器时钟漂移将会导致一个目标经度的估计误差, 即,

$$\Delta\chi \approx \omega_e s_d \cos(\zeta) \quad (2.9)$$

式中, ω_e 为地球自转速度, s_d 为时钟漂移, ζ 为目标纬度。通常情况下, 卫星轨道存在一定的轨道倾角, 即卫星飞行方向与北方向之间存在一个夹角。由此说明, 航天器时钟漂移将会在沿轨方向和垂轨方向上均会引起一个位置误差。

另外, 时钟漂移也将会导致沿轨方向上的位置误差, 即 $s_d V_{sw}$ 。其中, V_{sw} 为扫描带速度。

2.1.2 目标定位误差对几何定位的影响

在一景给定的影像帧内, 像素 (i, j) 的位置可以由已知的传感器位置和速度得到。如果更精确地计算, 需要天线相位中心在地球参考坐标系中的位置。同时联立三个方程, 即距离方程、多普勒方程和地球模型方程, 可以确定目标位置。

距离方程可以表示为,

$$R = |\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_t| \quad (2.10)$$

式中, \mathbf{R}_s 和 \mathbf{R}_t 为传感器和目标的位置矢量。结合式(2.5), 针对斜距影像, 斜距 R_j 与垂轨向像素 j 之间的数学关系为,

$$R_j = \frac{c}{2} (\tau - \tau_e) + \frac{c}{2f_s} (j + \Delta N) \quad (2.11)$$

式中, ΔN 为像素初始偏移量, 即起始采样窗口。这个偏移量通常为 0, 而在子扫描带处理应用中像素位置的计算是需要这个偏移量的。或者在处理器的步骤中, 这个偏移量的设计用来补偿距离徙动。

多普勒方程的表达式为,

$$f_{dc} = \frac{2}{\lambda R} (\mathbf{V}_s - \mathbf{V}_t) \cdot (\mathbf{R}_s - \mathbf{R}_t) \quad (2.12)$$

式中， λ 为雷达波长， f_{dc} 位多普勒中心频率。目标的速度可以通过目标的位置确定，即，

$$\mathbf{V}_t = \boldsymbol{\omega}_e \times \mathbf{R}_t \quad (2.13)$$

式中， $\boldsymbol{\omega}_e$ 为地球自转速度矢量。方位向参考函数中的 f_{dc} 值与真实的 f_{dc} 值之间的偏差引起目标在方位向上产生位移 Δx_{az} ，即，

$$\Delta x_{az} = \frac{\Delta f_{dc} V_{sw}}{f_R} \quad (2.14)$$

式中， Δf_{dc} 为方位向参考函数中的 Δf_{dc} 值与真实的 Δf_{dc} 值之间的差值， f_R 为参考函数中的多普勒调频率。在利用式(2.12)进行目标定位时，采用与参考函数中的 Δf_{dc} 值一致的多普勒中心频率，就可以补偿这个在方位向上的位移。但是，如果在参考函数中使用一个模糊的 Δf_{dc} 值，这个规则也会存在例外情况。

如果真实的 Δf_{dc} 值与参考的 Δf_{dc} 值之间的差值超过 $\pm f_p / 2$ ，那么将会产生一个像素位置误差，即，

$$\Delta x_{az} = m f_p V_{st} / f_R \quad (2.15)$$

式中， m 为方位向模糊数。

地球模型方程，考虑了地球形状为扁椭圆球体，即，

$$\frac{x_t^2 + y_t^2}{(R_e + h)^2} + \frac{z_t^2}{R_p^2} = 1 \quad (2.16)$$

式中， R_e 为赤道处的地球半径， h 为当地目标高程， R_p 为极半径，即，

$$R_p = (1-f)(R_e + h) \quad (2.17)$$

式中， f 为扁率。

假设在成像处理过程中不存在模糊的 Δf_{dc} 值，定位精度主要取决于传感器位置与速度矢量的精度、脉冲延迟时间的测量精度以及相对于地球模型的已知目标高度。然而，定位是不需要传感器的姿态信息。垂轨方向的目标位置由采样窗口决定，不依赖于天线足迹位置，也就是说与滚动角无关。同理，平台的偏航和俯仰导致了方位向斜视角，而斜视角可以通过杂波锁定技术确定的回波多普勒中心频率确定。因此，由于传感器的姿态精度与影像定位误差无关，SAR 传感器的定位精度比光学传感器高。

2.1.3 平台星历误差对几何定位的影响

平台星历误差包括平台位置和速度误差，可以分为三类：沿轨向误差、垂轨向误差和径向误差。

(1) 沿轨向位置误差， ΔR_x 。该项误差将引起方位向目标定位误差，即，

$$\Delta x_1 = \Delta R_x R_t / R_s \quad (2.18)$$

式中， ΔR_x 为沿轨向传感器位置误差。 ΔR_x 引起的距离向定位误差可以忽略。

(2) 垂轨向位置误差， ΔR_y 。该项误差主要引起目标距离向定位误差，即，

$$\Delta r_1 = \Delta R_y R_t / R_s \quad (2.19)$$

式中， ΔR_y 是传感器垂轨向位置误差。根据式(2.14)可知，在这个新的目标垂轨向位置，地球自转速度的变化将引起目标在方位向上的少量位移。然而，这种影响非常小，并且对于大多数应用来说是可以忽略的。

(3) 径向位置误差， ΔR_z 。本质上，该项误差是传感器高度 H 的估计误差。根据式(2.7)可知，对于一个传感器径向位置的改变，视角的变化为，

$$\Delta\gamma = \cos^{-1} \left[\frac{R^2 + R_s^2 - R_t^2}{2R_s R} \right] - \cos^{-1} \left[\frac{R^2 + (R_s + \Delta R_z)^2 - R_t^2}{2(R_s + \Delta R_z) R} \right] \quad (2.20)$$

这将导致一个近似的目标距离向位置误差，即，

$$\Delta r_2 \approx R \Delta\gamma / \sin \eta \quad (2.21)$$

视角的变化还会引起多普勒频移 Δf_{Dc} ，即，

$$\Delta f_{Dc} = \frac{2V_e}{\lambda} (\cos \zeta_t \sin \alpha_i \cos \gamma) \Delta\gamma \quad (2.22)$$

式中， V_e 为赤道处的地球切向速度， ζ_t 为目的地心纬度， α_i 为轨道倾角。根据式(2.14)和式(2.22)可知，引起的目标方位向定位误差为，

$$\Delta x_2 \approx \frac{\Delta f_{dc} \lambda R V_{sw}}{2V_{st}^2} \quad (2.23)$$

式中， V_{st} 为传感器与目标间的相对速度。另外，由于视角偏差 $\Delta\gamma$ 近似等效于入射角误差 $\Delta\eta$ ，根据式(2.8)可知，传感器的径向位置误差间接影响地距像素间隔。总之，传感器的径向位置误差将会引起垂轨向的比例误差。

(4) 传感器速度误差, 即沿轨向速度误差 ΔV_x 、垂轨向速度误差 ΔV_y 、径向速度误差 ΔV_z 。故传感器的速度误差可以分解为,

$$\Delta V = \Delta V_x \sin \theta_s + \Delta V_y \sin \gamma + \Delta V_z \cos \gamma \quad (2.24)$$

式中, θ_s 为斜视角。由于,

$$\Delta f_{dc} \approx 2\Delta V / \lambda \quad (2.25)$$

结合式(2.23), 可以得到方位向的定位误差, 即,

$$\Delta x_3 = (\Delta V_x \sin \theta_s + \Delta V_y \sin \gamma + \Delta V_z \cos \gamma) V_{sw} R / V_{st}^2 \quad (2.26)$$

传感器的速度误差分量引起的距离向定位误差是可以忽略的。然而, 沿轨向的速度误差将会产生一个方位向的比例误差, 即,

$$k_a = \Delta V_x / V_x \quad (2.27)$$

2.1.4 目标测距误差对几何定位的影响

(1) 传感器电子时延误差

根据式(2.11)可知, 传感器到目标的斜距是根据信号在大气中的传播时间而计算得到的。也就是说, 传感器的电子时延 τ_e 和涉及脉冲形成的数据记录窗口设置的不确定性都将引起斜距误差。通常来说, 传感器的电子时延是微秒量级的, 主要包括从发射脉冲控制信号(即数据记录窗口的时间参考)的产生到从天线处的脉冲发射所消耗的时间, 以及回波数据从接收机电子元器件开始接收到 ADC 所经过的时间。通过测量卫星发射前和卫星在轨运行期间的相对时间漂移, 可以反映出电子元器件的老化与温度变化。这个电子时延的一个典型测量方法是, 测量一个从发射链路经过环形器到接收链路的线性调频信号的时延, 而从天线馈电系统到辐射单元的额外时延是通过分析估计出来的。(关于 SAR 传感器的元器件组成结构可参见文献[121]。) 针对在天线馈电组件中发射/接收 (Transmitter and Receiver, TR) 组件的时延测量, 需要结合外部发射机/接收机单元设计一个相对复杂的实验方案。

(2) 信号传播时间误差

雷达信号在大气中的传播时间误差也是影响斜距估计误差的主要因素。

在式(2.5)中, 假设电磁波的传播速度等于光的速度, 即 c 。通常来说, 这个一个很好的近似, 但是在某些电离层的条件下, 雷达信号相比在真空环境下的传播时间会明显延长。这个增加的时延 τ_l 可以表示为,

$$\tau_1 \approx K_1 R_1 / f_c^2 \quad (2.28)$$

式中, R_1 为雷达信号通过电离层的传播路径长度, f_c 为雷达载波频率, K_1 是由电离层电子密度决定的比例因子。

(3) 电子时延测量误差

电子时延测量误差 $\Delta\tau$ 将会引起垂轨向的目标定位误差, 即,

$$\Delta r_3 = \frac{c\Delta\tau}{2\sin\eta} \quad (2.29)$$

(4) 目标高程误差

在目标定位算法中, 假设地球为一个扁椭球体。根据式(2.16)和式(2.17)可知, 目标高程的变化可以改变地球模型, 也就影响目标定位精度。由图 2.2 可知, 目标高程误差 Δh 可以等效成斜距误差, 即,

$$\Delta R = \Delta h / \cos\eta \quad (2.30)$$

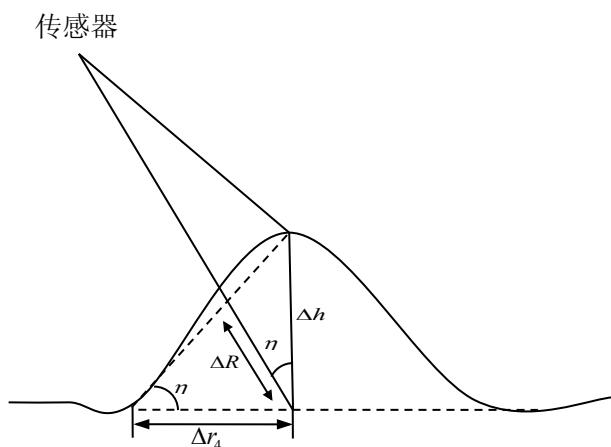


图 2.2 高程估计误差对目标定位的影响

Fig. 2.2 The effect of height estimation error on target range location

由此, 目标的地距定位误差为

$$\Delta r_4 = \Delta h / \tan\eta \quad (2.31)$$

2.2 星载 SAR 几何定位模型构建与改进

星载 SAR 系统的几何定位模型主要建立了地面目标点的三维空间坐标与相应像点的像平面二维坐标之间的数学关系，是星载 SAR 几何处理的基础。从模型构建形式的角度，星载 SAR 几何定位模型通常可分为：严密几何模型和通用几何模型。其中，经典的严密几何定位模型为 RD 模型，其根据 SAR 系统成像特性，主要采用距离方程和多普勒方程，具有严密的物理意义。常见的通用几何定位模型为 RPC 模型，而 RPC 模型适用于不同类型的传感器，无需了解传感器的成像过程和系统特性等参数，相比严密几何模型（RD 模型）而言，它可以便于快速进行摄影测量处理，而且应用上无需考虑新型传感器部分参数的改变，使用方便。

2.2.1 RD 定位模型与改进的数值解法

(1) RD 定位模型的构建方法

1982 年，Curlander 在 Brown 的基础上，发展了迄今为止仍为主流的经典几何定位模型——RD 定位模型^[39]。主要思想为，在一幅数字影像内，根据雷达波束中心与地球表面的相交，就可以对确定任一像素点进行定位。这个相交的过程可以通过三个基本关系实现：1) 确定传感器与目标间距离的 SAR 距离方程；2) 确定雷达波束中心平面的 SAR 多普勒方程；3) 描述地球形状的模型。基本原理为：与 SAR 系统之间具有相同斜距的地面对象点均分布在以星下点为圆心的同心圆束上，而卫星在成像过程中与地面对象点之间由于相对运动所产生的多普勒频率分布是双曲线束；在相同的地球高程面上，同心圆束和双曲线束的交点就所求得地面对象点^[122]，如图 2.3 所示。

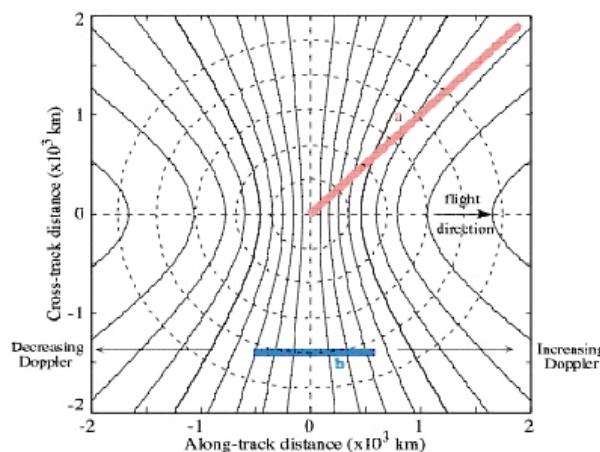


图 2.3 等距离线和等多普勒线示意图^[50]

Fig. 2.3 Schematic diagram of equal range line and equal doppler line

卫星在地球引力作用下绕地球飞行，同时地球绕自转轴自西向东的转动，卫星与地面目标间的相对运动比较复杂，所以通常在惯性坐标系（Geocentric Inertial Coordinate System, GEI）下构建模型方程。如图 2.4 所示，坐标系原点为地心， X 轴指向春分点， Z 轴与地球自转轴重合、指向正北方向， Y 轴使 $O-XYZ$ 符合右手定则。

在图 2.4 中， S 为 SAR 卫星天线相位中心， R_{sc} 和 V_{sc} 分别为其位置矢量和速度矢量； T 为地球表面上的某一地面点， R_{tc} 和 V_{tc} 分别为其位置矢量和速度矢量， R_{ts} 为 SAR 卫星与地面点间的距离矢量； T' 为地面点 T 在地球椭球表面上的投影， $T'T$ 为 T 点的高程 H_t 。

①SAR 距离方程

设卫星的位置矢量 $R_{sc} = (X_s, Y_s, Z_s)$ ，地面点位置矢量 $R_{tc} = (X_t, Y_t, Z_t)$ ，SAR 图像的距离向像素间隔为 m_r ，SAR 图像的近距端斜距为 R_0 ，则地面点 T 与天线相位中心 S 之间的斜距 R 可表示为，

$$R^2 = (X_s - X_t)^2 + (Y_s - Y_t)^2 + (Z_s - Z_t)^2 = (R_0 + m_r \cdot j)^2 \quad (2.32)$$

式中， j 为地面点 T 在 SAR 图像中所在位置的距离向列号；近距端斜距 $R_0 = c\tau_0 / 2$ ， τ_0 为采样延时，即雷达信号发射时刻与接收时刻间的时延；距离向像素间隔 $m_r = c / (2 \times f_s)$ 。

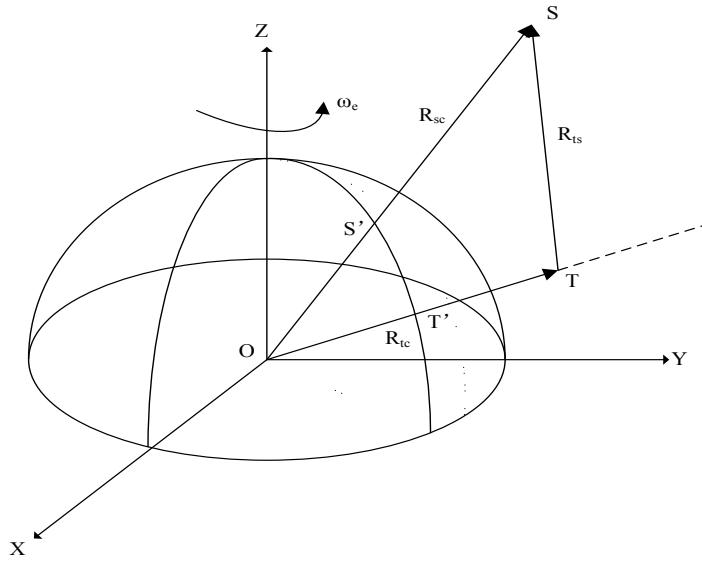


图 2.4 RD 定位模型的 GEI 坐标系

Fig. 2.4 GEI coordinate system of RD geolocation model

通常，卫星的轨道状态矢量是通过星上全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）获得。然而，GNSS 获得的轨道状态矢量是 GNSS 天线相位中心的，且状态矢量是在 WGS-84 坐标系（World Geodetic System - 1984 Coordinate System, 属地固坐标系）下的。由于 SAR 天线与 GNSS 天线固定安装在卫星的不同位置，故在实际计算时，需将实测的 GNSS 天线相位中心的状态矢量，通过坐标转换的方式^[123, 124]，转换到 SAR 天线相位中心，即，

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix}_{J2000} = R_{WGS-84}^{J2000} \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix}_{WGS-84} + m R_{body}^{J2000} \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

式中， m 为比例系数； $(X_g \ Y_g \ Z_g)^T$ 为 GNSS 在 WGS-84 系下实测的位置矢量； R_{WGS-84}^{J2000} 和 R_{body}^{J2000} 分别为 WGS-84 坐标系到 J2000 坐标系的转换矩阵、本体坐标系到 J2000 坐标系的转换矩阵； $(dX \ dY \ dZ)^T$ 为 GNSS 相位中心与天线相位中心在本体坐标系中的安装偏移矩阵。

②SAR 多普勒方程

由于雷达与地面目标间存在相对运动，导致在雷达处的收发频率不同，即产生多普勒频移现象。则目标到卫星的回波相位历史为^[125]，

$$\phi(t) = \frac{4\pi |R_t(t) - R_s(t)|}{\lambda} \quad (2.34)$$

回波的多普勒频率为，

$$f_d(t) = -\frac{\pi}{2} \frac{d\phi}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \frac{d}{dt} |R_t(t) - R_s(t)| \quad (2.35)$$

针对一个较短的时间 t ，地面目标的距离矢量可以表示为，

$$R_t(t) \approx R_t(0) + V_t(0) \cdot t + \frac{1}{2} A_t(0) \cdot t^2 \quad (2.36)$$

此时的卫星距离矢量可以表示为，

$$R_s(t) \approx R_s(0) + V_s(0) \cdot t + \frac{1}{2} A_s(0) \cdot t^2 \quad (2.37)$$

式中， $V_t(0)$ 、 $V_s(0)$ 、 $A_t(0)$ 、 $A_s(0)$ 分别为地面目标和卫星的速度矢量和加速度矢量。由于时间很短，所以有，

$$\begin{cases} R_t(t) \approx R_t(0) = R_t & V_t(0) = V_t & A_t(0) = A_t \\ R_s(t) \approx R_s(0) = R_s & V_s(0) = V_s & A_s(0) = A_s \end{cases} \quad (2.38)$$

根据式(2.38), 地面目标与雷达间的距离为,

$$\begin{aligned} |R_t(t) - R_s(t)| &= \left| (R_t - R_s) + (V_t - V_s) \cdot t - \frac{1}{2}(A_t - A_s) \cdot t^2 \right| \\ &= \sqrt{\left[(R_t - R_s) + (V_t - V_s) \cdot t - \frac{1}{2}(A_t - A_s) \cdot t^2 \right]^2} \\ &\quad \cdot \left[(R_t - R_s) + (V_t - V_s) \cdot t - \frac{1}{2}(A_t - A_s) \cdot t^2 \right] \\ &= \sqrt{(R_t - R_s) \cdot (R_t - R_s) + 2(R_t - R_s) \cdot (V_t - V_s) \cdot t} \\ &\quad + \left[(V_t - V_s) \cdot (V_t - V_s) - (R_t - R_s) \cdot (A_t - A_s) \right] \cdot t^2 + \dots \end{aligned} \quad (2.39)$$

将式(2.39)代入式(2.35), 可得^[126],

$$\begin{aligned} f_d(t) &\approx -\frac{1}{\lambda |R_t(t) - R_s(t)|} \left\{ 2(R_t - R_s) \cdot (V_t - V_s) \right. \\ &\quad \left. + 2[(V_t - V_s) \cdot (V_t - V_s) - (R_t - R_s) \cdot (A_t - A_s)] \cdot t \right\} \end{aligned} \quad (2.40)$$

由于雷达信号是线性调频信号, 令 $f_d(t) = f_{dc} + f_{dr} \cdot t$ 和 $R = |R_t(t) - R_s(t)|$, 则有,

$$f_{dc} = -\frac{2}{\lambda R} (V_t - V_s) \cdot (R_t - R_s) \quad (2.41)$$

$$f_{dr} = -\frac{2}{\lambda R} [(V_t - V_s) \cdot (V_t - V_s) - (R_t - R_s) \cdot (A_t - A_s)] \quad (2.42)$$

式中, f_{dr} 为多普勒调频斜率。

式(2.41)为 RD 定位模型的多普勒方程, 其定义了某个时刻雷达波束中心平面与地球表面的交集为近似双曲线族^[127]。通常情况下, 在正侧视条带模式获取的 SAR 影像中多普勒中心频率是斜距 R 的线性函数, 认为其沿方位向的变化可以忽略不计, 即,

$$f_{dc} = a_0 + a_1 \cdot sample = a_0 + a_1 \cdot \frac{R - R_0}{\Delta x} \quad (2.43)$$

式中, a_0 、 a_1 为线性方程的系数, $sample$ 为距离向列号, R_0 为近距端斜距, Δx 为距离向像素间隔。有的 SAR 卫星影像的辅助参数文件会提供 a_0 和 a_1 , 根据式(2.43)计算出不同距离门上的多普勒中心频率; 有的 SAR 卫星影像的辅助参数文件会沿距离向等间隔提供离散的多普勒中心频率值, 需要利用多项式拟合的方法求出 a_0 和 a_1 , 然后再内插不同距离门上

的多普勒中心频率。对于一般情况，多普勒中心频率需要考虑高次多项式拟合，甚至同时考虑沿方位向的二维变化。

③地球椭球模型方程

地面点 T 满足地球椭球模型方程，即，

$$\frac{X_t^2 + Y_t^2}{R_e^2} + \frac{Z_t^2}{R_p^2} = 1 \quad (2.44)$$

式中， R_e 为地球平均赤道半径， R_p 为地球椭球极半径，即 $R_p = (1-f)R_e$ ， f 为扁率。式(2.44)的地球椭球模型是在椭球表面目标点的高程 $H_t = 0$ 时确定的。当已知目标点高程信息的情况下，需对式(2.44)进行高程修正，通常表示为，

$$\frac{X_t^2 + Y_t^2}{(R_e + H_t)^2} + \frac{Z_t^2}{[(1-f)(R_e + H_t)]^2} = 1 \quad (2.45)$$

式(2.45)将地球椭球简化为标准球体，这样修正会产生目标的定位误差。由于地球椭球体的特征，目标点处和赤道处的法线向扩大幅度不同，因此在修正目标点处的椭球体时应将目标点大地高 H_t 归算到地球平均赤道出的高程 H'_t ，如图 2.5 所示^[51]。

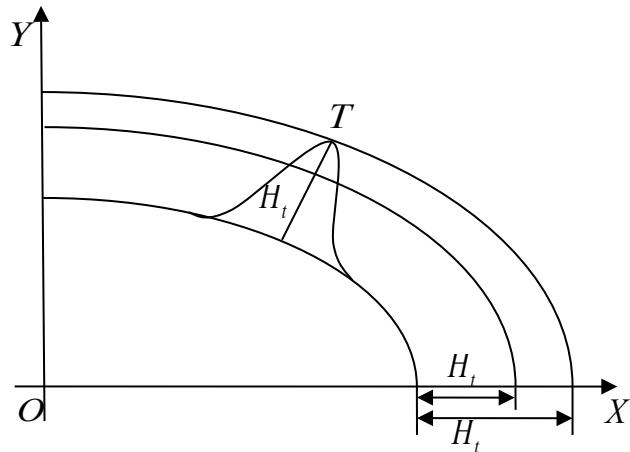


图 2.5 地球椭球修正引起不同纬度高程的变化

Fig. 2.5 Change of altitude with latitude caused by identification of earth model

关于目标点大地高归算到椭球体赤道半径的推导已在文献[51]中详细描述，本文不在赘述。由此可知，对式(2.44)的修正应为，

$$R'_e = \frac{\sqrt{(1-f)^2 x_t^2 + y_t^2}}{1-f} \quad (2.46)$$

式中, (x_t, y_t) 为目标点 T 在地球椭球体表面上投影点的坐标, 则有,

$$\begin{cases} x_t = \frac{R_e}{\sqrt{1+(1-f)^2 \tan^2 \varphi}} + \frac{H_t}{\sqrt{1+\tan^2 \varphi}} \\ y_t = \frac{R_e(1-f)^2 \tan \varphi}{\sqrt{1+(1-f)^2 \tan^2 \varphi}} + \frac{H_t \tan \varphi}{\sqrt{1+\tan^2 \varphi}} \end{cases} \quad (2.47)$$

式中, φ 为目标点的大地纬度。

在实际定位计算时, 卫星和目标点的位置矢量和速度矢量均是在 WGS-84 系下获得的, 以上构建的 RD 定位模型同样适用于 WGS-84 系。只需在式(2.32)、式(2.41)和式(2.44)中采用 WGS-84 系下的卫星和目标点的位置矢量和速度矢量即可。只不过, 在 WGS-84 系下的目标点速度矢量为零。事实上, 只要卫星矢量坐标和目标点矢量坐标的坐标系一致, 对于其它坐标系以上定义的 RD 定位模型也同样适用^[47]。

(2) 改进的 RD 定位模型数值解法

RD 定位模型建立了 SAR 影像坐标与地面点地理坐标的映射关系, 因此 RD 定位模型的解法有两种: 直接定位法和间接定位法。直接定位法是, 已知 SAR 影像中某像元的行列号 (i, j) 及该像元对应地物的高程 H_t , 求算该像元对应的地面点空间直角坐标 (X_t, Y_t, Z_t) , 再转换为大地坐标 (lat_t, lon_t, H_t) 。间接定位法是, 已知地面点的大地坐标 (lat_t, lon_t, H_t) 或空间直角坐标 (X_t, Y_t, Z_t) , 求解 SAR 影像上对应像元点的行列号 (i, j) 。

如果采用一个真正扁椭球体的地球模型, 那么为了计算目标位置的数值解需经过复杂的迭代过程^[122]。2012 年, 刘佳音等利用地固坐标系下目标速度为零的特性, 简化了 RD 定位模型并整理为一元四次方程, 然后利用一元四次方程求根方法推导了 RD 定位模型的数学解析解, 并与数值迭代求解方法进行比较分析。通过实验结果可以看出, 解析解与数值迭代解的结果相差为毫米量级, 可以认为两种解法精度一致^[54]。由于数值迭代法直接从方程本身出发, 避免了近似假设的公式推导。因此, 本文采用数值迭代的方法对 RD 定位模型进行解算。

ASF 在其公开的 SAR 处理程序中, 实现了一种基于很多迭代过程的数值解法^[128]。常用求解 RD 定位模型的数值迭代法有: 初值迭代法和 ASF 法^[45, 48]。通常来说, GNSS 获取的卫星状态矢量和地面目标的状态矢量均是在 WGS-84 系下的, 下面的求解方法均假设坐标系为 WGS-84 系, 即地面目标的速度矢量为 $(0, 0, 0)^T$ 。

①初值迭代法

直接定位法就是从影像算到地面的过程。针对 RD 定位模型的三个方程：式(2.32)、式(2.41)和式(2.44)，可以表示为，

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x, y, z) = (X_s - X_t)^2 + (Y_s - Y_t)^2 + (Z_s - Z_t)^2 - R^2 \\ f_2(x, y, z) = -\frac{2}{\lambda R}(V_t - V_s) \cdot (R_t - R_s) - f_{dc} \\ f_3(x, y, z) = \frac{X_t^2 + Y_t^2}{R_e^2} + \frac{Z_t^2}{R_p^2} - 1 \end{array} \right. \quad (2.48)$$

其线性化误差方程组为，

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = f_1(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial f_1}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial f_1}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial f_1}{\partial z}(z - z_0) - R^2 \\ F_2 = f_2(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial f_2}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial f_2}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial f_2}{\partial z}(z - z_0) - f_{dc} \\ F_3 = f_3(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial f_3}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial f_3}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial f_3}{\partial z}(z - z_0) - 1 \end{array} \right. \quad (2.49)$$

式(2.49)的误差方程可以表示成，

$$V = Bx - l \quad (2.50)$$

式中，

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x} & \frac{\partial f_3}{\partial y} & \frac{\partial f_3}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(X_s - x_0) & 2(Y_s - y_0) & 2(Z_s - z_0) \\ \frac{2V_{xs}}{\lambda R} & \frac{2V_{ys}}{\lambda R} & \frac{2V_{zs}}{\lambda R} \\ \frac{2x_0}{R_e^2} & \frac{2y_0}{R_e^2} & \frac{2z_0}{R_e^2} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$x = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z]^T \quad (2.52)$$

$$\begin{aligned} l &= [-F_1^0 \quad -F_2^0 \quad -F_3^0]^T \\ &= [R^2 - f_1(x_0, y_0, z_0) \quad f_{dc} - f_2(x_0, y_0, z_0) \quad 1 - f_3(x_0, y_0, z_0)]^T \end{aligned} \quad (2.53)$$

直接定位法的具体实现算法如下：

- 1) 根据 SAR 影像像元的行列号(*sample, line*)，计算该像元对应的斜距 R 和多普勒中心频率 f_{dc} ；

- 2) 以 SAR 影像中心点坐标 (lat_0, lon_0, H_0) 为初值, 计算该点的空间直角坐标 (x_0, y_0, z_0) ;
- 3) 根据式(2.49)和式(2.50), 计算坐标改正量 $x = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T$;
- 4) 更新目标点的空间直角坐标, 即 $(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z)$;
- 5) 重新计算坐标改正量 $x = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z)^T$, 判断坐标改正量 Δx 、 Δy 和 Δz 是否都小于 10^{-5} m, 若小于则迭代终止, 否则继续执行 3) 进行迭代运算;
- 6) 将更新后的空间直角坐标转换成地理坐标 (lat, lon, H) , 即 SAR 影像像元 $(sample, line)$ 对应的地面点坐标。

间接定位法就是从地面算到影像的过程, 其具体实现算法如下:

- 1) 把地面目标点的已知坐标转为 WGS-84 系下的空间直角坐标 (X_t, Y_t, Z_t) , 得到目标点的位置矢量 R_{t0} 和速度矢量 V_{t0} ;
- 2) 以 SAR 影像的中间行号为初始值, 根据对应关系计算中间行号的方位向时间 t_i ;
- 3) 利用方位向时间 t_i 通过插值轨道状态数据计算 t_i 所对应的卫星位置矢量 R_{s0} 和速度矢量 V_{s0} ;
- 4) 将 R_{s0} 、 V_{s0} 、 R_{t0} 、 V_{t0} 代入距离方程(2.32)和多普勒方程(2.41)求出斜距 R 和多普勒中心频率 f_{dc} 。根据所求的斜距 R 计算多普勒中心频率 f'_{dc} , 再通过数值微分方法, 利用下式推算多普勒中心频率变化率,

$$df_{dc} = (f_{dc} - f'_{dc}) / dt \quad (2.54)$$

根据辅助数据和斜距 R , 可以插值出多普勒中心频率 f_{dc0} ;

- 5) 同样根据式(2.54), 计算 f_{dc} 和 f_{dc0} 的时间差 dt ;
- 6) 更新时间 $t_i = t_{i-1} + dt$;
- 7) 重新计算 f_{dc} 和 f_{dc0} , 判断 $|f_{dc} - f_{dc0}|$ 是否小于一个预先设定的极小值, 若小于则迭代终止, 否则转向 3) 继续迭代运算。
- 8) 通过 t_i 计算行号 $line$ 的值; 再根据 t_i 内插计算卫星位置 R_{s0} 和 R_{t0} , 由此得出斜距 R ; 通过多普勒中心频率与斜距的关系求出距离向列号 $sample$, 此时 $(sample, line)$ 就是目标点在 SAR 影像平面内的坐标。

②ASF 法

ASF 数值方法的基本思路是, 已知斜距 R 和多普勒中心频率 f_{dc} , 可以根据卫星与目标点的空间几何关系计算出雷达波束的视角 β 与斜视角 α , 进而可以求出地面目标点的位置矢量 R_{t0} 。关于 ASF 数值解法的详细推导和实现过程, 可参见文献[47], 本文不再赘述。

假设一颗 700km 左右的 SAR 卫星，对地面某一目标点大斜视角凝视成像，类似于长时间的聚束模式，通过已知的卫星位置和地面对目标点位置，根据文献[47]中的 ASF 算法计算不同时刻的雷达视角和雷达斜视角，结果如图 2.6 所示。

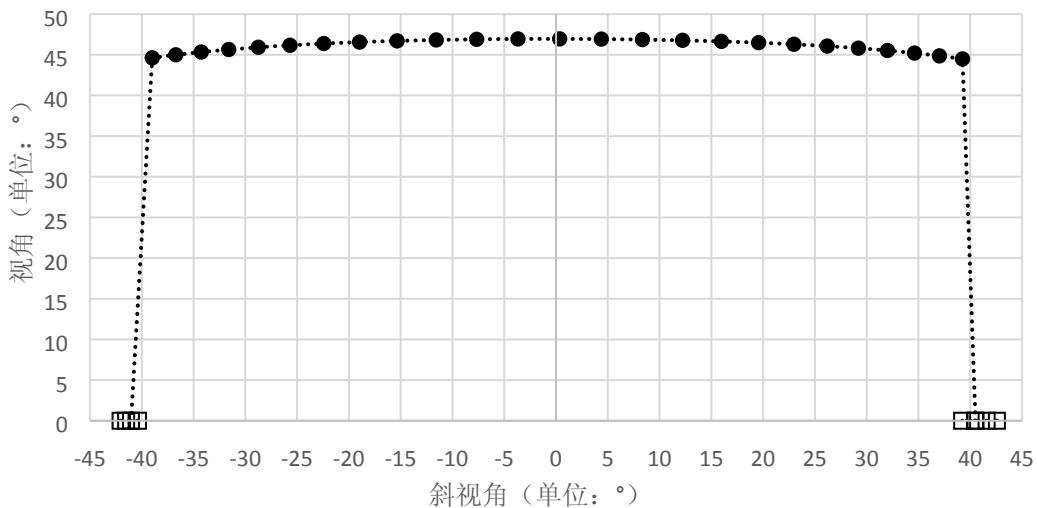


图 2.6 ASF 算法得到的视角和斜视角

Fig. 2.6 The look angle and squint angle calculated by ASF algorithm

图 2.6 中，横坐标为雷达斜视角，纵坐标为雷达视角，实心圆点表示 ASF 计算出来的斜视角与视角的一一对应关系，空心方格表示无效值。可以看出，在斜视角为 $\pm 40^\circ$ 左右时，ASF 算法无解。

由此说明，文献[47]中介绍的 ASF 数值解法仅适用于正侧视或者小斜视成像的 SAR 卫星，不适用于大斜视成像模式的 SAR 卫星，该数值解法精度随雷达波束斜视角的增大而降低，甚至导致无解。因此，本文在文献[47]介绍的 ASF 数值解法基础上，提出一种改进的 ASF 数值解法。

ASF 数值解法建立的局部坐标系 $S-xyz$ ，如图 2.7 所示。 $\angle\beta$ 为雷达视角， $\angle\alpha$ 为雷达斜视角。

由图 2.7 可知，视角 β 定义的是 $\angle S'SP$ ，斜视角 α 定义的是 $\angle PST$ 。当 SAR 卫星正侧视成像时，斜视角 α 为零，则有 $\angle\beta = \angle S'SP = \angle S'ST$ ；当 SAR 卫星斜视成像时，斜视角 α 不为零，则有 $\angle\beta = \angle S'SP \neq \angle S'ST$ 。因此，在根据三角函数余弦定理计算视角 β 时，应利用三角形 ΔSOP 计算，而不是三角形 ΔSOT 。此时， $SP = R \cdot \cos \alpha$ 。

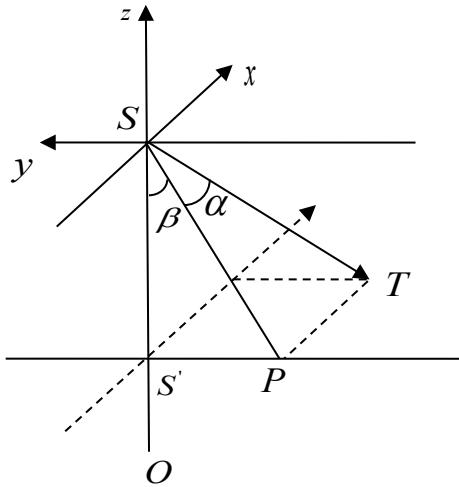


图 2.7 ASF 数值解法的局部坐标系示意图

Fig. 2.7 Schematic diagram of the local coordinate system of ASF solving method

根据改进方法，需要对 ASF 数值解法中已知 R 和 α 求 β 这一过程进行修改，即对函数 $\beta = GetLookFromRangeYaw(R, \alpha)$ 的实现过程修改。改进后的具体实现如下：

1) 参数初始化。令迭代次数 $i=0$ ；利用下视计算初始雷达视角 β_i ，

$$\beta_i = \cos^{-1} \left(\frac{|R_{sc}|^2 + (R \cdot \cos \alpha)^2 - R_p^2}{2|R_{sc}|R \cdot \cos \alpha} \right) \quad (2.55)$$

2) 将 β_i 和 α 带入 $R = FR(\alpha, \beta)$ ^[47]，计算得到 R' ，则，

$$\Delta R = R - R' \quad (2.56)$$

3) 根据以下两个公式计算入射角 η ，

$$\begin{cases} \sin(\eta) = \frac{|R_{sc}| \sin(\beta_i)}{R_p} \\ \tan(\eta) = \frac{\sin(\eta)}{\sqrt{1 - \sin^2(\eta)}} \end{cases} \quad (2.57)$$

4) 计算雷达视角变化量 $\Delta\beta$ ，

$$\Delta\beta = \frac{\Delta R \cos(\alpha)}{R \cos(\alpha) \tan(\eta)} = \frac{\Delta R}{R \tan(\eta)} \quad (2.58)$$

5) 更新雷达视角为，

$$\beta_{i+1} = \beta_i + \Delta\beta \quad (2.59)$$

6) 若 $\Delta R < 0.1$ 则迭代结束, 输出 β_{i+1} 的值; 否则, 令 $i = i + 1$, 转向 2) 继续迭代计算。

根据改进的 ASF 算法, 采用与图 2.6 相同的数据, 重新计算不同时刻的雷达视角和雷达斜视角, 结果如图 2.8 所示。

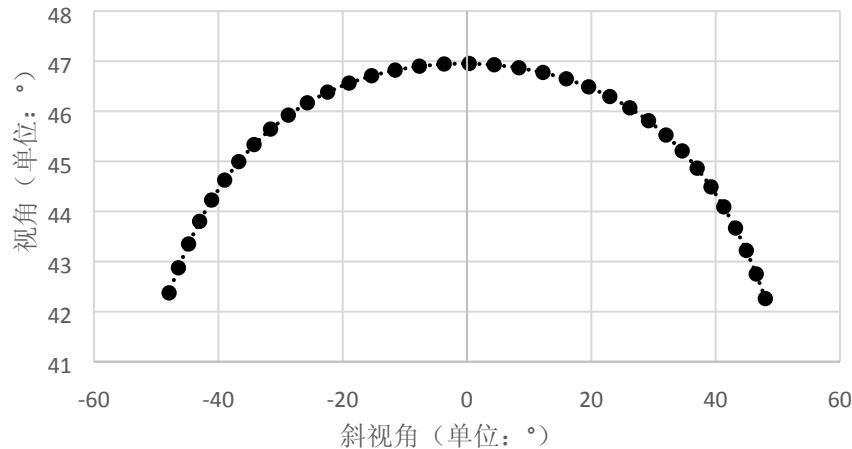


图 2.8 改进的 ASF 算法得到的视角和斜视角

Fig. 2.8 The look angle and squint angle calculated by improved ASF algorithm

从图 2.8 可以看出, 改进的 ASF 算法有效解决了经典 ASF 算法无法适用于大斜视成像模式 SAR 卫星定位的问题。

2.2.2 RPC 定位模型与虚拟重成像

RPC 模型适用于不同类型的传感器, 无需了解传感器的成像过程和系统特性等参数, 相比严密几何模型 (RD 模型) 而言, 它可以便于快速进行摄影测量处理, 而且应用上无需考虑新型传感器部分参数的改变, 使用方便。当前, RPC 模型可高精度拟合国际上典型的星载 SAR 严密几何模型^[57]。

(1) RPC 定位模型与解算

通过比值多项式, RPC 模型构建了地面点大地坐标(lat, lon, H)与其对应的像点坐标($sample, line$)关系, 并通过地面坐标和影像坐标标准化到-1 和 1 之间实现增强参数求解的稳定性。对于一景星载 SAR 影像, 定义如下比值多项式:

$$\begin{cases} Y = \frac{N_L(P, L, H)}{D_L(P, L, H)} \\ X = \frac{N_s(P, L, H)}{D_s(P, L, H)} \end{cases} \quad (2.60)$$

式中,

$$\begin{aligned}
 N_L(P, L, H) = & a_1 + a_2 L + a_3 P + a_4 H + a_5 L P + a_6 L H + a_7 P H + a_8 L^2 + a_9 P^2 \\
 & + a_{10} H^2 + a_{11} P L H + a_{12} L^3 + a_{13} L P^2 + a_{14} L H^2 + a_{15} L^2 P + a_{16} P^3 + a_{17} P H^2 , \\
 & + a_{18} L^2 H + a_{19} P^2 H + a_{20} H^3 \\
 D_L(P, L, H) = & b_1 + b_2 L + b_3 P + b_4 H + b_5 L P + b_6 L H + b_7 P H + b_8 L^2 + b_9 P^2 \\
 & + b_{10} H^2 + b_{11} P L H + b_{12} L^3 + b_{13} L P^2 + b_{14} L H^2 + b_{15} L^2 P + b_{16} P^3 + b_{17} P H^2 , \\
 & + b_{18} L^2 H + b_{19} P^2 H + b_{20} H^3 \\
 N_s(P, L, H) = & c_1 + c_2 L + c_3 P + c_4 H + c_5 L P + c_6 L H + c_7 P H + c_8 L^2 + c_9 P^2 \\
 & + c_{10} H^2 + c_{11} P L H + c_{12} L^3 + c_{13} L P^2 + c_{14} L H^2 + c_{15} L^2 P + c_{16} P^3 + c_{17} P H^2 , \\
 & + c_{18} L^2 H + c_{19} P^2 H + c_{20} H^3 \\
 D_s(P, L, H) = & d_1 + d_2 L + d_3 P + d_4 H + d_5 L P + d_6 L H + d_7 P H + d_8 L^2 + d_9 P^2 \\
 & + d_{10} H^2 + d_{11} P L H + d_{12} L^3 + d_{13} L P^2 + d_{14} L H^2 + d_{15} L^2 P + d_{16} P^3 + d_{17} P H^2 , \\
 & + d_{18} L^2 H + d_{19} P^2 H + d_{20} H^3
 \end{aligned}$$

a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 为 RPC 模型系数, 其中 b_1 和 d_1 通常为 1; (P, L, H) 为 (lat, lon, H) 经过标准化计算的地面坐标; (Y, X) 为 $(sample, line)$ 经过标准化计算的影像坐标。

常用的 RPC 模型解算有两种方法: 地形相关和地形无关。通常, 星载 SAR 的 RPC 模型参数是利用最小二乘平差原理, 根据 RD 定位模型所生成虚拟控制格网, 采取地形无关的求解方案进行解算的^[61]。文献[57]已将 RPC 模型参数的求解方法和流程进行了详细论述, 本文不再赘述。在方程迭代求解过程中, 采用王新洲的谱修正法迭代方法计算 RPC 模型参数, 解决法方程病态的问题^[129]。而当法方程呈病态时, 收敛速度稍慢, 甚至不收敛; 当法方程呈良态时, 经几次迭代就可收敛到精确解。然而, 根据带有误差的 RD 模型求解 RPC 模型参数会带有误差, 通常采用像方补偿方案消除 RPC 模型的系统误差, 提高基于 RPC 模型的影像目标定位精度^[130, 131]。

(2) 虚拟重成像与误差分析

由于 RPC 模型具有简单性、通用性和高效性, 且在其替代星载 SAR 影像的严密成像几何模型——RD 模型方面也得到了广泛的研究和应用。然而, 迄今为止大量的分析研究都是针对正侧视模式、零多普勒条件的星载 SAR 影像, 其 RPC 模型的拟合精度较高, 可以满足摄影测量几何处理的要求。但是对于斜视模式、非零多普勒条件的星载 SAR 影像而言, 由于多普勒中心频率随距离的变化极大, 引起了方位分辨率的变化, 故 RPC 模型的拟合精度不高。因此, 本文采用虚拟重成像技术, 在理想卫星轨道上构造出正侧视模式的 SAR 卫星, 对星载 SAR 影像按照零多普勒条件的成像方式进行虚拟重成像, 消除 RPC

模型在方位向上的拟合误差，构建了满足零多普勒条件的星载 SAR 影像，实现了虚拟重成像后星载 SAR 影像的几何定向精度无损失。

由于 TerraSAR-X 影像是在零多普勒频率条件下成像，故 RPC 模型的拟合精度高。但如果在斜视成像模式、非零多普勒频率条件下，多普勒中心频率在测绘带内随距离的变化如图 2.9 所示，变化幅度在 1000Hz 左右^[77]。可见，在非零多普勒频率条件下，多普勒频率随距离变化较大。

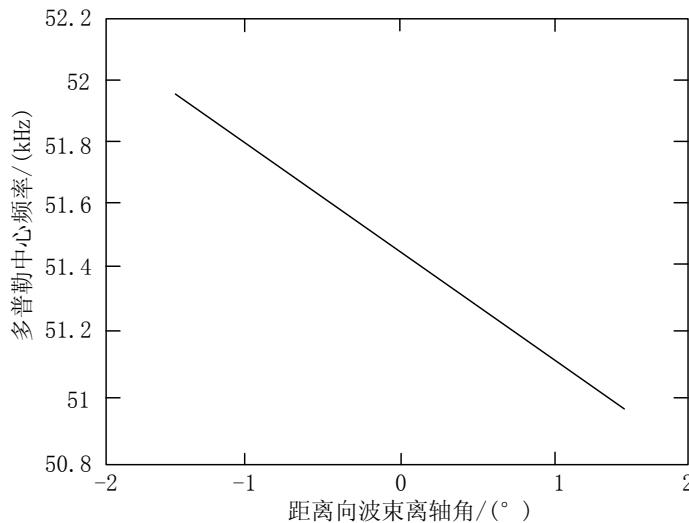


图 2.9 多普勒中心频率随距离的变化

Fig. 2.9 Variation of doppler center frequency with distance

对于斜距 R 处和相对于侧视雷达的沿航迹坐标 x 的点目标，相对于发射频率的多普勒中心频率(2.41)可以表示为，

$$f_{dc} = \frac{2V_{st} \sin \beta}{\lambda} \approx \frac{2V_{st}x}{\lambda R} \quad (2.61)$$

式中， V_{st} 是卫星与地面对目标点的相对速度。

根据公式(2.61)，方位分辨率为，

$$\delta x = \left(\frac{\lambda R}{2V_{st}} \right) \delta f_{dc} \quad (2.62)$$

由公式(2.62)可以看出，多普勒频率的变化会影响到方位向分辨率的变化，类似于星载光学传感器中时间延迟积分 (Time Delay Integration, TDI) 的电荷耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD) 积分时间受经纬度和地面高低起伏等因素影响，造成该积分时间存

在跳变，这会引起像元在沿轨向地面覆盖范围的不一致^[123]，降低了 RPC 模型的拟合精度。同理，非零多普勒频率也会降低星载 SAR 影像的 RPC 模型拟合精度。

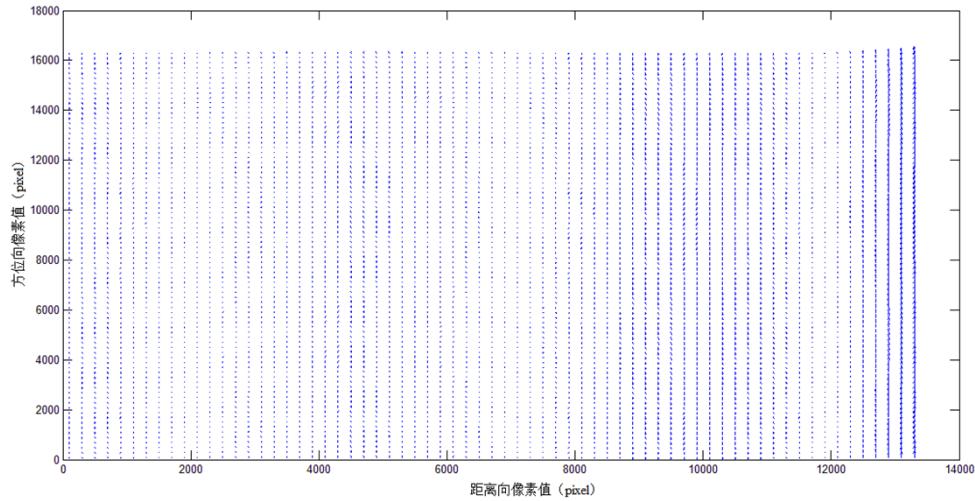


图 2.10 咸宁地区 YG-7 号 SAR 影像的 RPC 模型拟合精度残差图

Fig. 2.10 Residual plot of the fitting accuracy of RPC model for YG-7 SAR image in Xianning area

以咸宁地区的遥感 7 (YG-7) 号 SAR 影像为例，采用文献[58]的方法，RPC 模型拟合距离多普勒方程的精度如表 2.1 所示，图 2.10 为 RPC 模型拟合精度的残差图。可以看出，RPC 模型的检查格网中误差在 0.15 个像素左右，误差集中在方位向上，方位向的最大残差为 0.58 像素，且检查点的残差在距离向上呈现由小到大的趋势。在斜视模式、非零多普勒条件下利用距离多普勒模型生成的 YG-7 号 SAR 卫星影像，RPC 模型的拟合精度不满足 5% 像素精度（美国摄影测量手册）。

表 2.1 咸宁地区 YG-7 号 SAR 影像的 RPC 模型拟合精度

Tab. 2.1 The fitting accuracy of RPC model for YG-7 SAR image in Xianning area

数据	检查点（像素）		
	距离向	方位向	平面
YG-7 号 SAR	最大值	0.00983	0.57836
影像数据	平均值	0.00364	0.15979

通过非零多普勒频率影响的消除，建立理想正侧视模式的星载 SAR 影像严密成像几何模型，利用 RPC 模型和星载 SAR 影像的 RD 几何模型以及高程参考数据，建立了虚拟重成像后的星载 SAR 影像与原始 SAR 影像的一一对应关系，基于这种关系即可完成灰度重采样。基于虚拟重成像方法的 SAR 影像制作流程如图 2.11 所示。

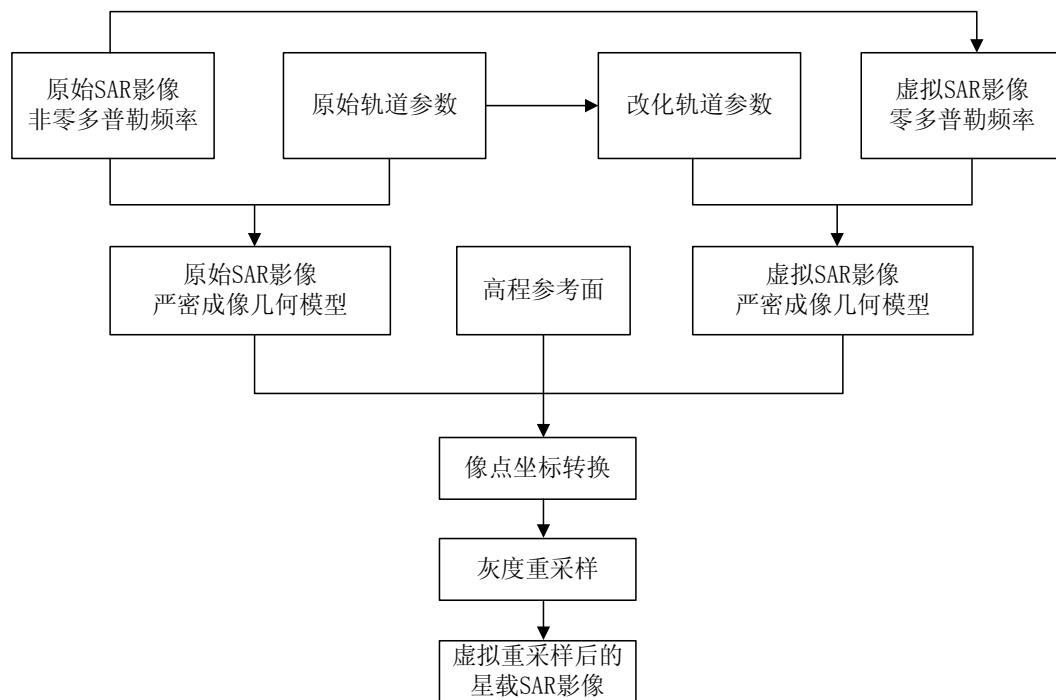


图 2.11 虚拟重成像技术流程图

Fig. 2.11 Technical flowchart of virtual re-imaging technology

- 1) 基于星载 SAR 影像的卫星轨道参数和非零多普勒频率构建星载 SAR 影像的严密成像几何模型；
- 2) 基于星载 SAR 影像的四个角点像面坐标，计算出虚拟重成像后星载 SAR 影像的最佳位置和范围，计算虚拟重成像后星载 SAR 影像的四个角点像面坐标；
- 3) 选取精密轨道或进行轨道滤波，构建理想的零多普勒频率的 SAR 卫星，利用步骤 2) 中计算出的四个角点像面坐标，建立虚拟重成像后星载 SAR 影像的严密成像几何模型；
- 4) 通过航天飞机雷达地形测绘使命(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)的 DEM 或者平均高程面，根据几何关系，即可计算出虚拟重成像后星载 SAR 影像上像点(x, y)对应在原始 SAR 影像上的位置(x', y')；
- 5) 利用(x', y')临近像元灰度内插即可得到(x, y)对应的灰度值；
- 6) 重复步骤 4) 和 5)，直到生成整幅影像。

根据星载 SAR 影像虚拟重成像后的影像范围, 依据最小二乘平差原理, 结合影像区域的 SRTM-DEM 数据, 采用 RD 模型构建虚拟地面空间控制格网和检查格网, 并利用控制点求解 RPC 模型参数。

虚拟成像时刻的卫星位置和实际成像时刻的卫星位置在沿轨方向上存在偏差, 该偏差将在方位向上导致精度损失。图 2.12 为实际成像时刻与虚拟成像时刻的截面示意图。

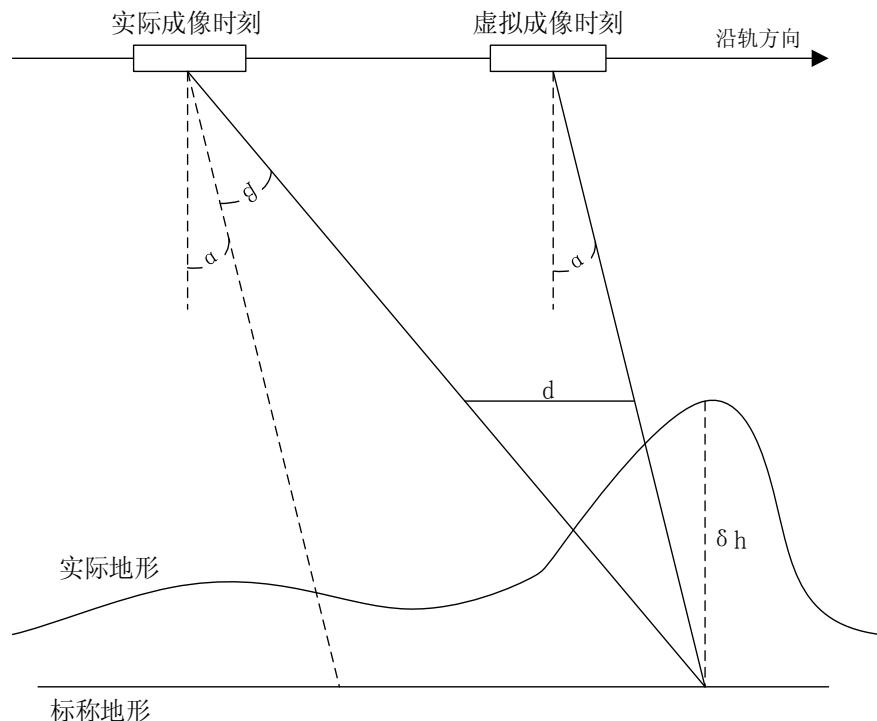


图 2.12 高差引起的投影差

Fig. 2.12 The projection error caused by height difference

由图 2.12 可以看出, 当虚拟成像时刻物方投影点的高程与该点真实高程的差值为 δh 时, 该地形起伏在像面产生的方位向投影差 d 为,

$$d = \frac{\delta h \cdot L}{H} \quad (2.63)$$

式中, L 为实际成像时刻与虚拟成像时刻卫星位置的偏差, H 为卫星轨道高度。

根据简化的多普勒中心频率公式(2.61)可知,

$$L = \frac{\lambda R f_{dc}}{2 v_s} \quad (2.64)$$

式中, v_s 为卫星速度, R 是斜距。

然而从图 2.12 中, 根据三角函数关系, 也可知,

$$L = R \cdot \sin \beta \quad (2.65)$$

将式(2.64)和式(2.65)代入式(2.63), 可得,

$$d = \frac{\delta h \cdot \lambda \cdot R \cdot f_{dc}}{2v_s \cdot H} = \frac{\delta h \cdot R \cdot \sin \beta}{H} \quad (2.66)$$

由公式(2.66)可知, 虚拟成像过程中, 当斜视角 β 趋近 0 时, 即虚拟成像时刻与实际成像时刻的卫星位置偏差很小时, 因采用假定高程面引起方位向像差 d 也趋近为 0, 由此引起的误差可以忽略。

当斜视角 β 较大时, 即虚拟成像时刻与实际成像时刻的卫星位置偏差较大, 此时的方位向像差主要取决于 h , 即体现为 DEM 的精度。当 DEM 精度足够高时, 方位向像差 d 也趋近为 0, 由此引起的误差也可以忽略。

因此, 在虚拟重成像中采用该景影像范围内的 SRTM-DEM 作为高程参考面, 减少因生产流程而引人的误差。

2.3 大气传播延迟改正模型

雷达信号从 SAR 系统发射到接收, 经过大气传播存在延迟影响, 随大气环境的改变而变化, 影响斜距的测量精度。一般来说大气传播延迟改正模型^[132]为,

$$\Delta L = \frac{1}{\cos(\eta)} \int_z^\infty (n(z) - 1) dz \quad (2.67)$$

式中, $n(z)$ 为天顶方向大气折射率, η 为入射角。

大气天顶延迟的计算依赖于构建精确的大气模型, 以此获取大气折射率空间分布模式。大气层对雷达信号的传播延迟影响主要分为中性大气和电离层影响, 而中性大气通常分成干和湿两部分^[133]。按照大气成分的划分, Puyssegur 在综合了云雾量及游离态电子影响, 给出了大气折射率计算模型^[134]如下:

$$\begin{cases} (n - 1) = 10^{-6} N \\ N = k_1 \underbrace{\frac{P_d}{T}}_{dry air} + k_2 \underbrace{\frac{e}{T}}_{wet air} + k_3 \underbrace{\frac{e}{T^2}}_{liquid water} + k_4 \underbrace{W_{cloud}}_{water} + k_5 \underbrace{\frac{TEC}{f_c^2}}_{ionosphere} \end{cases} \quad (2.68)$$

式中, P_d 是干大气压强, e 为湿大气压强, T 为地表温度(K), W_{cloud} 水汽含量(kg/m^3), TEC 是电离层电子密度, f_c 为电磁波信号的发射频率。其中, 第一项是由流体静力学效

应（空气压力）引起的大气延迟，第二项为湿度（水蒸气）引起的大气延迟，第三项为液体（小水滴）变化引起的大气延迟，第四项为电离层延迟。

2.3.1 对流层大气传播延迟改正模型

Owens^[135]结合流体静力学方程和非理想气体公式推导出中性大气中干分量和湿分量的距离改正模型，如下式：

$$\begin{cases} \Delta L_D = 10^{-6} k_1 \frac{R_m}{M_d} g_m^{-1} \cdot P_{surf} \\ \Delta L_W = 10^{-6} k_2 \frac{R_m}{M_w} \cdot P_w \end{cases} \quad (2.69)$$

式中， ΔL_D 为干大气延迟， ΔL_W 为湿大气延迟，地表压强 $P_{surf} = P_d + e$ ， P_w 为大气可降水量， M_d 、 M_w 分别为干、湿大气分子量， $M_d = 28.9644 \text{ kg/kmol}$ ， $M_w = 18.0152 \text{ kg/kmol}$ ； R_m 为摩尔气体常量， $R_m = 8.31451 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ 。

k_1 、 k_2 值与卫星载荷发射电磁波信号的频率相关，求解公式：

$$\begin{cases} k_1 = 0.237134 + 68.39397 \frac{(130 + \lambda^{-2})}{(130 - \lambda^{-2})^2} + 0.45473 \frac{(38.9 + \lambda^{-2})}{(38.9 - \lambda^{-2})^2} \\ k_2 = 0.648731 + 0.0174174 \lambda^{-2} + 3.55750 \times 10^{-4} \lambda^{-4} + 6.1957 \times 10^{-5} \lambda^{-6} \end{cases} \quad (2.70)$$

由式(2.69)可知，干大气和湿大气的延迟量求解还需要获取大气的地表压强和大气可降水量。全球大气模型(Global Atmospheric Models, GAM)可以提供由卫星和气象基站记录的地表气象数据，包括温度、气压、水汽含量、风速风向等。本文以美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的大气分析模型作为外部数据^[136]，模型提供了每隔 6 小时 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬网格点存储的等压面数据。

2.3.2 电离层大气传播延迟改正模型

电离层主要是指在离地面约 60~1000km 高度范围内的大气层部分，而在大约 400km 高度处的自由电子密度最大，故通常将整个电离层近似为一个非常理想化的单层电离层，也就是把整个垂直分布在电离层中的自由电子全部压缩到一个单层壳层上。下图 2.13 为单层电离层模型示意图， P' 为星下点 P 在垂直方向上单层电离层处的压缩点/穿刺点，故电离层延迟是压缩点 P' 处的电离层总电子含量(Total Electron Content, TEC)和视向与压缩

点 P' 处单层电离层法线方向的夹角有很大关系。由此，可以得到雷达信号在传播路径上的电离层延迟^[137-139]为，

$$\Delta L_1 = K \cdot \frac{TEC}{f_c^2} \cdot \frac{1}{\cos \theta'} \quad (2.71)$$

式中， $K = 40.28 m^3 / s^2$ ，TEC 的单位是 10^{16} 个电子/米²。由上式可知，电离层延迟与 TEC 和电磁波频率有关。

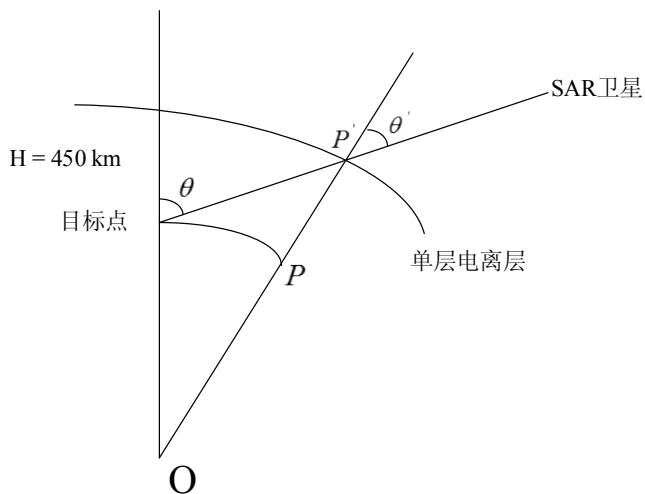


图 2.13 单层电离层模型内插示意图

Fig. 2.13 Schematic diagram of the interpolation of single-layer ionosphere model

欧洲定轨中心 (European Center for orbit determination, CODE) 以 IONEX(Ionosphere Exchange Format)文件格式每天每过 2 个小时会产生一幅全球电离层 TEC 图。如果按一天中从协调世界时 (Coordinated Universal Time, UTC) 零时到 24 时，故每天公布 13 幅 (从 2014 年 10 月 19 日开始，以 1 小时为间隔每天给出 25 幅)。按照全球经度方向间隔 5° ，纬度方向间隔 2.5° ，经度范围未- 180° W 至 180° E，纬度范围为 87.5° S 至 -87.5° N，共有 5183 个格网点，实现电离层的格网划分。由此对于某一特定时间和位置的穿刺点，首先采用双线性内插原理分别对已知相邻已知历元时刻的 TEC 含量进行四角点网格空间内插，然后进行时间的双线性内插，具体过程如下：

第一，根据成像时刻，取得全球的 IONEX 文件格式的 TEC 含量图，然后以穿刺点的经纬度 (lat, lon) 采用双线性插值计算相邻格网点的 TEC 含量，具体的公式为：

$$\begin{aligned} I(lat, lon) = & I_{0,0} \times \left(1 - \frac{lat - lat_0}{\Delta lat}\right) \left(1 - \frac{lon - lon_0}{\Delta lon}\right) + I_{1,0} \times \left(\frac{lat - lat_0}{\Delta lat}\right) \left(1 - \frac{lon - lon_0}{\Delta lon}\right) \\ & + I_{1,1} \times \left(\frac{lat - lat_0}{\Delta lat}\right) \left(\frac{lon - lon_0}{\Delta lon}\right) + I_{0,1} \times \left(1 - \frac{lat - lat_0}{\Delta lat}\right) \left(\frac{lon - lon_0}{\Delta lon}\right) \end{aligned} \quad (2.72)$$

式中， lat_0 为左下角网格点的纬度， lon_0 为左下角网格点的精度， Δlat 为电离层网格点的纬度间隔， Δlon 为电离层网格点的经度间隔。

第二，得到空间内插后进行相应时间点的时间双线性内插，具体的公式是：

$$I(lat, lon, t) = I(lat, lon)_i \times \frac{T_{i+1} - t}{T_{i+1} - T_i} + I(lat, lon)_{i+1} \times \frac{t - T_i}{T_{i+1} - T} \quad (2.73)$$

第三，取得第二步取得的垂直方向上的 TEC 后，选取合适的映射函数，即可计算雷达信号在传播路径上的电离层延迟值。

2.4 基于 RPC 模型的星载 SAR 平差模型

对于星载 SAR 的几何精度评价，一般通过正射纠正和立体 SAR 两个方面进行，也就是评价星载 SAR 的平面精度和高程精度。考虑到 RPC 模型无需考虑传感器的成像状态等参数，具有通用性，且使用方便，本文采用 RPC 模型构建星载 SAR 平差模型，用于星载 SAR 的几何精度评价。

虽然几何定标消除的是星载 SAR 系统的系统误差，而对于一景 SAR 影像来说，由于卫星星历、传感器延时和测距等观测值仍存在少量系统几何定位误差。根据 2.1 节的误差分析可知，对星载 SAR 几何定位精度的影响主要有两类：平移误差和比例误差。因此，为了提升 RPC 模型的评价精度，采用定义在影像面的仿射变换来校正这两类误差。在影像上定义仿射变换^[65, 140]为，

$$\begin{cases} \Delta y = e_0 + e_1 \cdot sample + e_2 \cdot line \\ \Delta x = f_0 + f_1 \cdot sample + f_2 \cdot line \end{cases} \quad (2.74)$$

式中， Δy 和 Δx 为控制点在影像坐标系中的量测坐标与真实坐标的差值，即平差值； e_0, e_1, e_2 和 f_0, f_1, f_2 是影像的平差参数， $line$ 和 $sample$ 是控制点在影像坐标系中的列行号。

参数 e_0 吸收所有沿航迹方向的误差，包括沿航迹方向的平台位置误差、径向平台位置误差引起的多普勒频移的方位向部分、平台速度误差以及飞行器时钟漂移。这些物理参数共同造成了影像的方位向的像素平移。

同样的，参数 f_0 吸收了垂直航迹方向的误差，包括垂直航迹方向的平台位置误差、径向平台位置误差引起的视角变化、电子延时测量误差、或者在电磁波传播速度中的无规则变化引起斜距误差。这些物理参数共同造成了影像的距离向的像素平移。

参数 e_1 吸收传感器本振偏移和平台沿轨方向的速度矢量误差所造成一个方位向的比例误差，参数 f_1 吸收径向平台误差和测距误差引起的反射角测量误差所造成一个距离向的比例误差。同时，参数 e_2 和 f_2 也吸收少量的比例误差。

由此，基于仿射变换的平差模型中每一个平差参数都有物理含义，可以避免数值上的病态性问题。

基于 RPC 模型的空间前方交会是指由两张或两张以上影像的 RPC 模型参数和像点坐标来确定相应地面点在物方空间坐标系中坐标的方法。然而，卫星遥感影像的 RPC 模型参数解求一般利用与地面无关的模式，通过卫星遥感影像的严格成像模型计算拟合而成，故存在较大的系统性误差。因此，本文采用基于 RPC 模型的卫星遥感影像区域网平差方法提高定位精度。

同样，在影像上定义同如公式(2.74)的仿射变换，根据基于 RPC 模型线性化的公式推导，可以对每个连接点列如下线性方程：

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \left(\frac{\partial F_x}{\partial a_1} \cdot \Delta a_1 + \frac{\partial F_x}{\partial a_2} \cdot \Delta a_2 + \frac{\partial F_x}{\partial a_3} \cdot \Delta a_3 + \frac{\partial F_x}{\partial b_1} \cdot \Delta b_1 + \frac{\partial F_x}{\partial b_2} \cdot \Delta b_2 + \frac{\partial F_x}{\partial b_3} \cdot \Delta b_3 \right. \\ \quad \left. + \frac{\partial F_x}{\partial D_{lat}} \cdot \Delta D_{lat} + \frac{\partial F_x}{\partial D_{lon}} \cdot \Delta D_{lon} + \frac{\partial F_x}{\partial D_{hei}} \cdot \Delta D_{hei} \right) + F_{x0} \\ v_y = \left(\frac{\partial F_y}{\partial a_1} \cdot \Delta a_1 + \frac{\partial F_y}{\partial a_2} \cdot \Delta a_2 + \frac{\partial F_y}{\partial a_3} \cdot \Delta a_3 + \frac{\partial F_y}{\partial b_1} \cdot \Delta b_1 + \frac{\partial F_y}{\partial b_2} \cdot \Delta b_2 + \frac{\partial F_y}{\partial b_3} \cdot \Delta b_3 \right. \\ \quad \left. + \frac{\partial F_y}{\partial D_{lat}} \cdot \Delta D_{lat} + \frac{\partial F_y}{\partial D_{lon}} \cdot \Delta D_{lon} + \frac{\partial F_y}{\partial D_{hei}} \cdot \Delta D_{hei} \right) + F_{y0} \end{array} \right. \quad (2.75)$$

记为：

$$V = Bt + AX - l \quad (2.76)$$

同样可以对每个控制点列如下线性方程^[64]：

$$\left\{ \begin{array}{l} v_x = \left(\frac{\partial F_x}{\partial a_1} \cdot \Delta a_1 + \frac{\partial F_x}{\partial a_2} \cdot \Delta a_2 + \frac{\partial F_x}{\partial a_3} \cdot \Delta a_3 + \frac{\partial F_x}{\partial b_1} \cdot \Delta b_1 + \frac{\partial F_x}{\partial b_2} \cdot \Delta b_2 + \frac{\partial F_x}{\partial b_3} \cdot \Delta b_3 \right) + F_{x0} \\ v_y = \left(\frac{\partial F_y}{\partial a_1} \cdot \Delta a_1 + \frac{\partial F_y}{\partial a_2} \cdot \Delta a_2 + \frac{\partial F_y}{\partial a_3} \cdot \Delta a_3 + \frac{\partial F_y}{\partial b_1} \cdot \Delta b_1 + \frac{\partial F_y}{\partial b_2} \cdot \Delta b_2 + \frac{\partial F_y}{\partial b_3} \cdot \Delta b_3 \right) + F_{y0} \end{array} \right. \quad (2.77)$$

记为：

$$V = Bt - l \quad (2.78)$$

式中,

$$B = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial a_1} & \frac{\partial F_x}{\partial a_2} & \frac{\partial F_x}{\partial a_3} & \frac{\partial F_x}{\partial b_1} & \frac{\partial F_x}{\partial b_2} & \frac{\partial F_x}{\partial b_3} \\ \frac{\partial F_y}{\partial a_1} & \frac{\partial F_y}{\partial a_2} & \frac{\partial F_y}{\partial a_3} & \frac{\partial F_y}{\partial b_1} & \frac{\partial F_y}{\partial b_2} & \frac{\partial F_y}{\partial b_3} \end{pmatrix}, t = (\Delta a_1 \quad \Delta a_2 \quad \Delta a_3 \quad \Delta b_1 \quad \Delta b_2 \quad \Delta b_3)^T$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial D_{lat}} & \frac{\partial F_x}{\partial D_{lon}} & \frac{\partial F_x}{\partial D_{hei}} \\ \frac{\partial F_y}{\partial D_{lat}} & \frac{\partial F_y}{\partial D_{lon}} & \frac{\partial F_y}{\partial D_{hei}} \end{pmatrix}, X = (\Delta D_{lat} \quad \Delta D_{lon} \quad \Delta D_{hei})^T$$

$$l = \begin{pmatrix} -F_{x0} \\ -F_{y0} \end{pmatrix}, V = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$$

因此, 根据最小二乘平差构建法方程:

$$\begin{pmatrix} A^T A & A^T B \\ B^T A & B^T B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ X \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A^T l \\ B^T l \end{pmatrix} \quad (2.79)$$

采用最小二乘法进行求解, 获得每个待定点的坐标。

另外, 由于 SAR 均为侧视成像, 从不同航线 (不同位置) 对同一地区获取雷达影像, 形成立体像对的方式有两种, 即卫星在目标同侧成像构成立体像对和卫星在目标异侧成像构成立体像对^[14], 如图 2.14 所示。

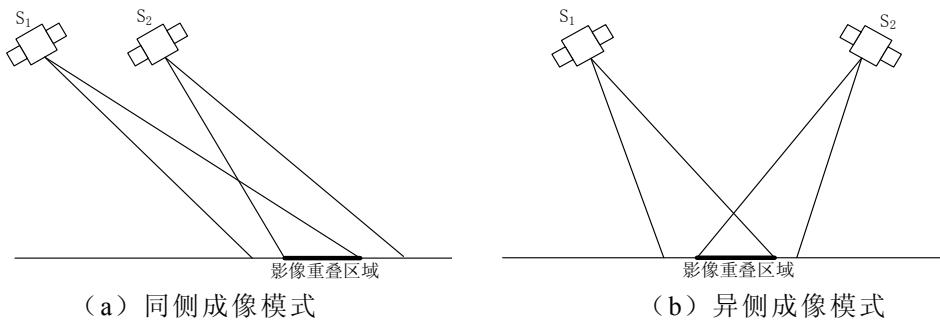


图 2.14 立体像对的获取模式

Fig. 2.14 Acquisition Mode of Stereo-pair

在立体 SAR 测量中, 由于斜距误差 E_r , 引起目标点的测量误差可以分为在高程和垂轨方向上的误差 E_h 和 E_x , 即,

$$\begin{cases} E_h = \left[(\sin^2 \theta_L + \sin^2 \theta_R)^{1/2} / \sin \Delta \theta \right] \cdot E_r \\ E_x = \left[(\cos^2 \theta_L + \cos^2 \theta_R)^{1/2} / \sin \Delta \theta \right] \cdot E_r \end{cases} \quad (2.80)$$

式中, θ_L 和 θ_R 分别为左右影像的视角, $\Delta\theta$ 为交会角^[142]。

2.5 实验与分析

2.5.1 RPC 模型拟合精度分析

实验采用湖北省咸宁市崇阳县地区的遥感 7 (YG-7) 号 SLC 类型的幅度数据, 2012 年 4 月 27 日成像, 有效影像高度为 16426 行, 每行有 13469 像素, 影像中心经纬度为 29.604° 和 114.006° 。该星载 SAR 影像数据覆盖范围位于咸宁市西南方向、崇阳县和赤壁市交界处, 北面以山地、丘陵、湖泊为主, 南面以平原、丘陵、河流为主, 海拔高程在 0~1000m 之间。

根据张过等利用 RPC 模型用于星载 SAR 影像的验证结果: 三阶的分母不相同的 RPC 模型的精度最高, 本文的实验均是基于该模型。本文实验是在控制点格网大小为 68 像素 \times 83 像素, 高程 15 层, 检查点的格网大小为 67 像素 \times 82 像素, 高程 14 层的条件下获得的。

YG-7 号卫星 SAR 影像的辅助文件中, 多普勒频率是根据距离向的变化等间距 (835 samples) 给出的, 轨道参数是等时间间隔 (1s) 给出的, 为了计算每个像素的多普勒频率和轨道参数, 需要分别对多普勒频率和轨道参数进行拟合。对于多普勒频率, 在 YG-7 号卫星 SAR 影像的距离多普勒模型中, 采用一次多项式、二次多项式和三次多项式拟合; 在虚拟重成像后星载 SAR 影像的距离多普勒模型中, 多普勒频率均为 0。卫星轨道拟合的方法很多, 考虑到轨道参数的拟合精度和平滑程度, 本文分别选用三次多项式、四次多项式和五次多项式拟合卫星轨道参数进行对比分析。综上, 利用上述各个平滑的拟合方法分别拟合多普勒频率和轨道参数, 并计算 RPC 模型的拟合精度, 对比结果见表 2.2。

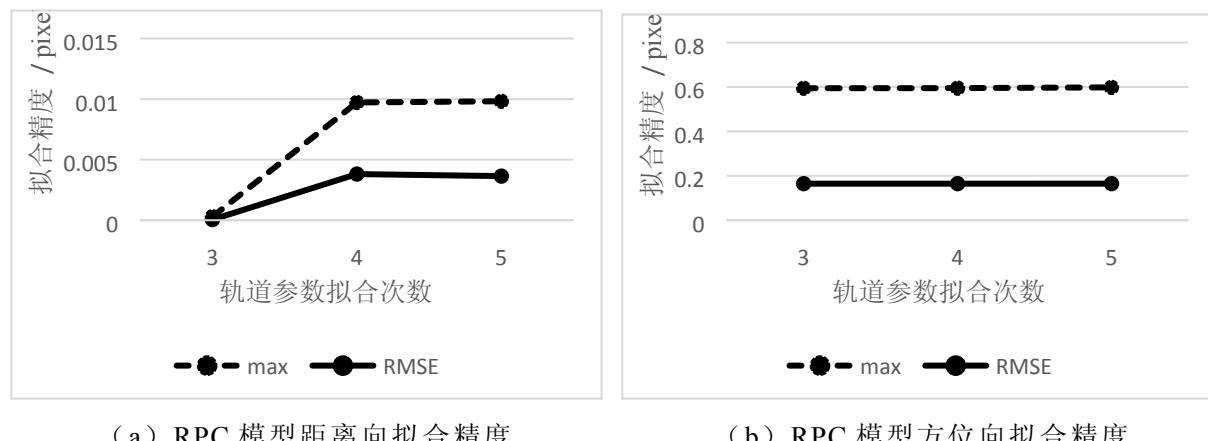
由表 2.2 的结果和图 2.15、图 2.16 可以看出, 基于斜视模式、非零多普勒频率条件下的 YG-7 号卫星 SAR 影像数据, 在相同的多普勒频率拟合阶数下, 随着轨道参数拟合阶数增加, RPC 模型的拟合精度略有降低; 在相同的轨道参数拟合阶数下, 随着多普勒频率拟合阶数增加, RPC 模型的拟合精度无明显变化, 仅在方位向上 RPC 模型的拟合精度提升 0.01 个像素左右。但无论多普勒频率和轨道参数采用何种光滑的拟合方法, 距离向的 RPC 模型的拟合精度均比较高, 中误差优于 0.006 个像素, 最大残差优于 0.01 个像素, 而方位向的 RPC 模型的拟合精度不高, 中误差在 0.17 个像素左右, 最大残差在 0.58 个像素左右, 结合图 2.9 可以说明 YG-7 号卫星 SAR 影像在非零多普勒频率条件下, 由于多

普勒频率随距离变化大，影响方位向分辨率，导致方位向的 RPC 模型的拟合精度差，基本呈现由近距端到远距端精度变差的趋势。

表 2.2 咸宁地区 YG-7 号卫星 SAR 影像 RPC 模型拟合精度对比

Tab. 2.2 The fitting accuracy comparison of RPC model for YG-7 SAR image in Xianning

数据	多普勒 频率拟 合阶数	轨道参 数拟合 阶数	检查点（单位：像素）					
			距离向		方位向		平面	
			max	RMSE	max	RMSE	max	RMSE
咸宁地区 YG-7 号 SLC 数据	一阶	三阶	0.00029	0.00005	0.59430	0.16457	0.59430	0.16457
		四阶	0.00972	0.00381	0.59475	0.16456	0.59476	0.16460
		五阶	0.00982	0.00364	0.59810	0.16459	0.59811	0.16463
	二阶	三阶	0.00028	0.00005	0.57462	0.15977	0.57462	0.15977
		四阶	0.00972	0.00381	0.57509	0.15976	0.57510	0.15980
		五阶	0.00983	0.00364	0.57836	0.15979	0.57836	0.15983
	三阶	三阶	0.00028	0.00005	0.57512	0.15873	0.57512	0.15873
		四阶	0.00972	0.00381	0.57558	0.15872	0.57559	0.15876
		五阶	0.01319	0.00542	0.57560	0.15990	0.57560	0.15999
虚拟重成像 后的 SAR 数 据	零多普 勒	三阶	0.00029	0.00007	0.00029	0.00006	0.00030	0.00009
		四阶	0.00985	0.00382	0.00023	0.00008	0.00985	0.00382
		五阶	0.00979	0.00358	0.00474	0.00190	0.01088	0.00405



(a) RPC 模型距离向拟合精度

(b) RPC 模型方位向拟合精度

图 2.15 相同多普勒中心频率拟合阶数和不同轨道参数拟合阶数的 RPC 模型拟合精度对比

Fig. 2.15 The fitting accuracy comparison of RPC model based on the same fitting orders of the doppler center frequency and the different fitting orders of the orbit parameters

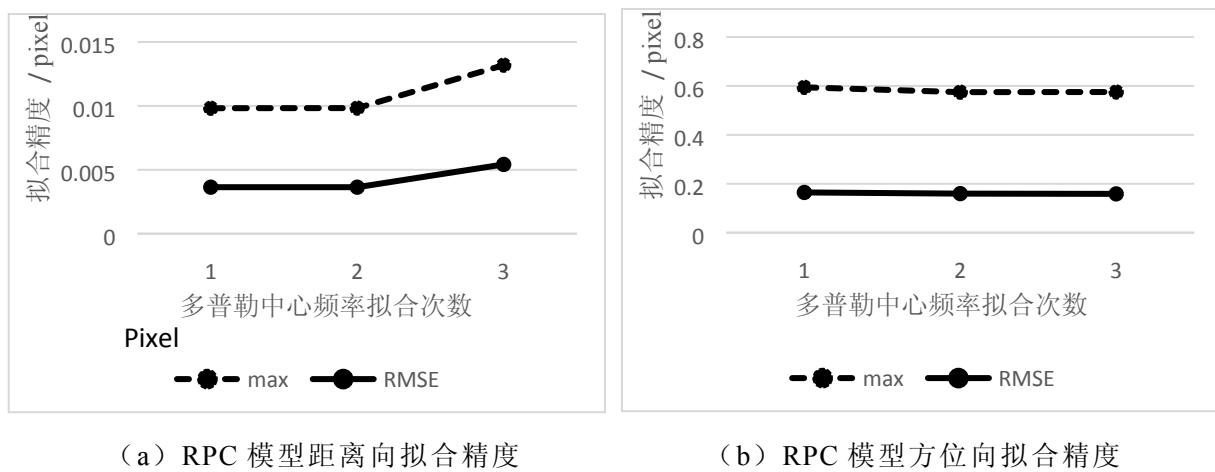


图 2.16 不同多普勒中心频率拟合阶数和相同轨道参数拟合阶数的 RPC 模型拟合精度对比

Fig. 2.16 The fitting accuracy comparison of RPC model based on the different fitting orders of the doppler center frequency and the same fitting orders of the orbit parameters

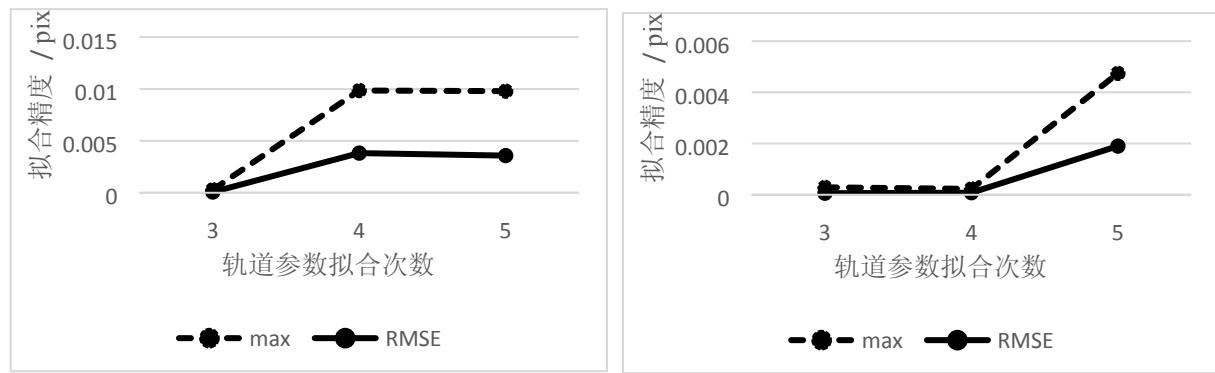


图 2.17 虚拟重成像后的基于不同轨道参数拟合阶数的 RPC 模型拟合精度对比

Fig. 2.17 The fitting accuracy comparison of RPC model of the virtual re-imaged SAR image based on the different fitting orders of the orbit parameters

然而,由表 2.2 的结果和图 2.17 可以看出,虚拟重成像后的 SAR 影像,方位向的 RPC 模型的拟合精度显著提升,中误差均优于 0.005 个像素,最大残差优于 0.01 个像素,而距离向的 RPC 模型的拟合精度与原始 SAR 影像基本一致,中误差均优于 0.004 个像素,最大残差优于 0.01 个像素。显然,通过虚拟重成像后的 SAR 影像,其 RPC 模型的拟合精度得到了显著提高,平面的 RPC 模型的拟合精度优于 0.005 个像素。

最后,根据 YG-7 号卫星 SAR 影像成像区域的地面控制点,分别对 YG-7 号卫星 SAR 影像和虚拟重成像后的 SAR 影像进行有无控制点条件下的单景定向试验,定向精度结果见表 2.3。

表 2.3 咸宁地区 YG-7 号卫星 SAR 影像和虚拟重成像后 SAR 影像的单景定向精度结果对比

Tab. 2.3 The individual orientation accuracy comparison of the YG-7 SAR image and the virtual re-imaged SAR image

数据	控制点数	检查点数	最大残差(像素)			中误差(像素)		
			距离向	方位向	平面	距离向	方位向	平面
咸宁地区 YG-7 号 SAR 影像	0	12	30.313	4.156	30.320	28.078	2.566	28.195
	4	8	3.886	2.822	4.109	2.170	1.484	2.629
	6	6	2.691	3.119	3.214	1.512	1.719	2.289
虚拟重成像后的 SAR 影像	0	12	30.273	3.949	30.282	28.065	2.524	28.178
	4	8	3.866	2.796	4.138	2.153	1.460	2.602
	6	6	2.638	3.126	3.210	1.493	1.695	2.259

由表 2.3 的结果可以看出, 咸宁地区 YG-7 号卫星 SAR 影像和虚拟重成像后的 SAR 影像在有无控制点的条件下, 单景定向精度基本一致。但是, 从最大残差上可以看出, 在无控情况下, 方位向的最大残差结果有明显的提升, 从 4.156 个像素提升至 3.949 个像素, 提升了 0.207 个像素。由此可知, 虽然虚拟成像后的 SAR 影像 RPC 模型的拟合精度显著提高, 但是由于用于定向实验的控制点较均匀分布, YG-7 号卫星 SAR 影像的远距端为非零多普勒频率对方位向分辨率影响大的区域, 因此, 有少部分控制点定向精度有提升, 故单景定向精度略有提升。实际上, 本文的虚拟重成像的方法在一定程度上消除了部分系统误差。

2.5.2 大气传播延迟影响分析

针对大气传播延迟改正模型, 根据 2012 年到 2016 年的 NCEP 和 CODE 辅助数据计算雷达信号的大气传播延迟改正量(中性大气延迟和电离层延迟), 分析不同时间的大气延迟对几何定标精度的影响。

(1) 中性大气延迟精度分析

通过以下两种方式计算雷达信号的大气传播延迟量。以地面点为插值点, 计算该点天顶方向的延迟后, 再利用映射函数计算传播路径的延迟值; 在地面点天顶方向的 20km 范围内, 以 200 米的高程间隔在信号传播路径方向上进行插值, 计算该插值点在 200 米个高程范围内的大气传播延迟值, 然后累加计算出信号在传播路径上总的大气延迟值。最后,

对比两种方式的延迟量差值, 2016年1月1日到2016年5月11日(总计132天)的延迟量差值结果如图 2.18 所示。

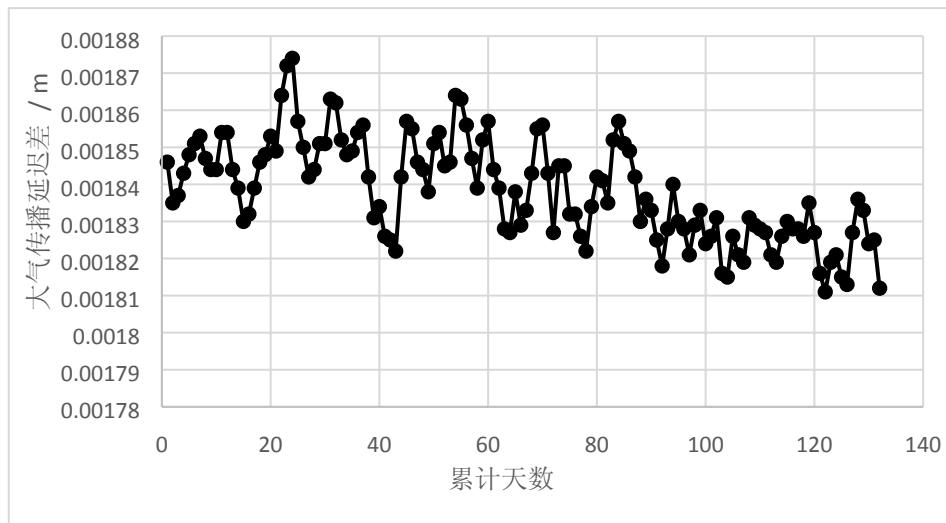


图 2.18 大气改正模型精度分析

Fig. 2.18 Accuracy analysis of atmospheric correction model

从图 2.18 可以看出, 两种方式计算出的大气传播延迟值相差较小, 均优于 2mm。由此说明, 本文采用的大气传播延迟改正模型精度比较可靠。

(2) 不同分布地面点的大气传播延迟影响分析

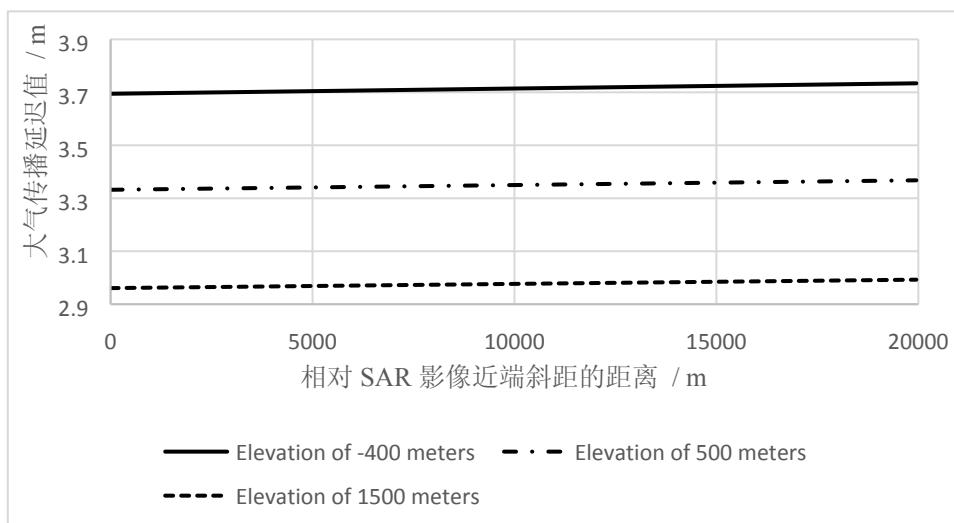


图 2.19 相同高程、不同距离门

Fig. 2.19 Same height and different ranges

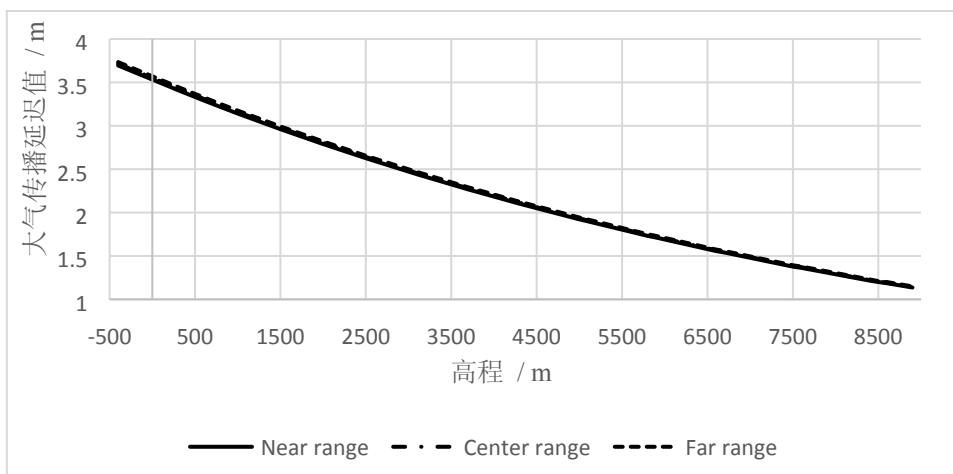


图 2.20 相同距离门, 不同高程

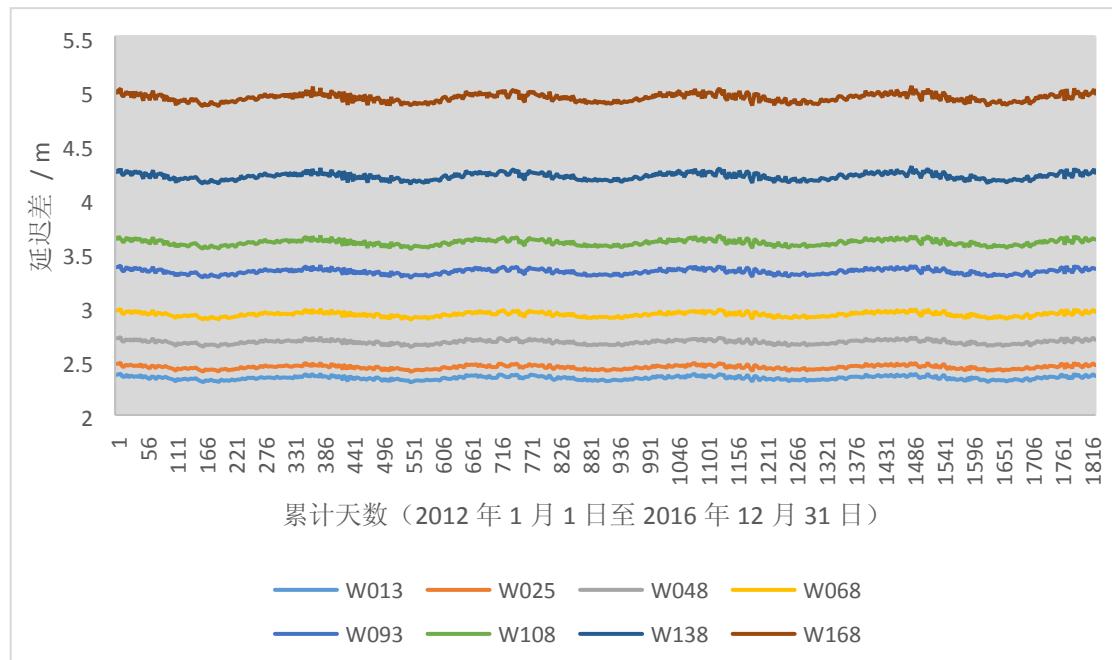
Fig. 2.20 Same range and different heights

同一场景内, 影响大气传播延迟的两个主要因素是高程和入射角。不同高程处的大气压强存在差异, 影响天顶方向的延迟量; 不同入射角导致映射函数存在量的差异, 影响传播路径上的延迟量。为了分析一个场景内的大气传播延迟量受地形和分布范围的影响, 通过对嵩山地区、43° 入射角的遥感 13 号数据进行分别试验分析。为了分析入射角的影响, 沿某一方位向以 150 米间隔均匀采样地面点, 采样范围 20km, 假设每一个采样点的高程相同, 分别计算各采样点的大气传播延迟量, 如图 2.19 所示; 为了分析高程的影响, 采用相同的采样点, 每个采样点的高程以 100 米高程间隔从-400 米到 8900 米(参考全球陆地的海拔最高——珠穆朗玛峰海拔 8844.43 米和海拔最低——死海湖面海拔-392 米)均匀取值, 分别计算每个采样点在不同高程上的大气传播延迟量, 如图 2.20 所示。

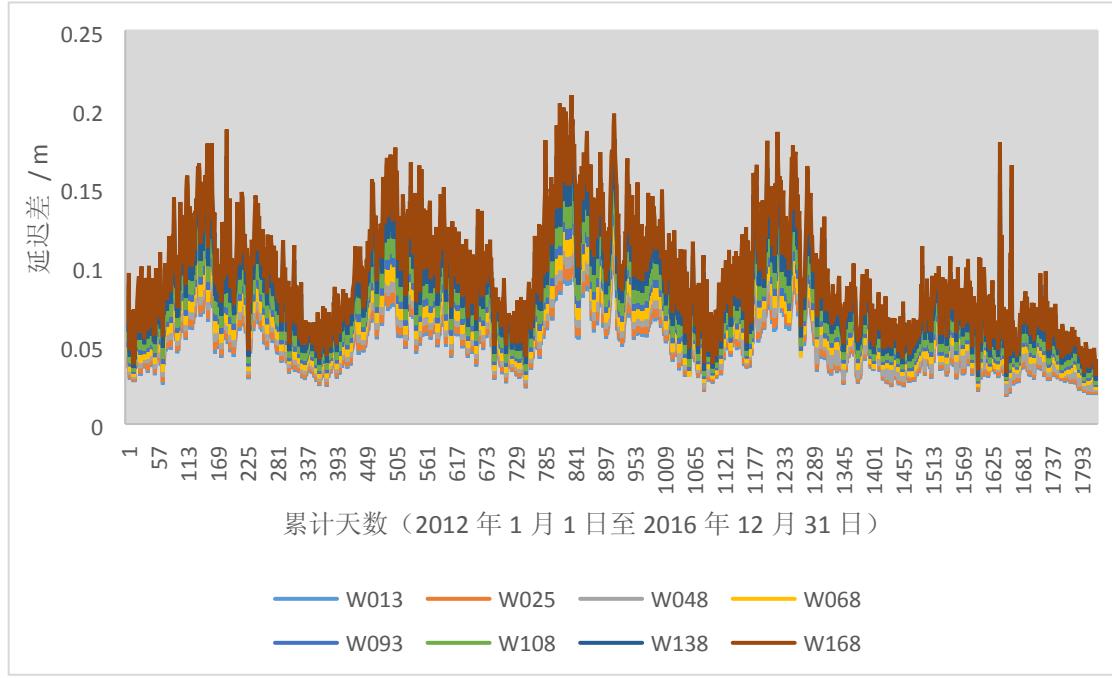
由图 2.19 和图 2.20 可以看出, 在高程相同的情况下, 大气传播延迟随距离门由近及远逐渐变大, 20km 幅宽的影像内最大变化量不超过 0.04m; 在相同距离门条件下, 大气传播延迟随高程的升高而减小, 海拔每上升 100m 时大气传播延迟平均减小 0.02-0.04m 左右; 一个场景内, 高程对大气传播延迟的影响比入射角的影响大。由于高程每上升 100 米, 大气压降低约为 10mbar, 然而计算电离层的穿刺点几乎不受影响, 故高程变化主要对中性大气延迟产生影响。针对高低起伏在 200m 以下的平原和丘陵地区, 标准场景(20km 幅宽)内大气传播延迟变化不超过 0.08m; 针对高低起伏在 500m 以上的山地, 标准场景(20km 幅宽)内大气传播延迟变化至少为 0.1m; 针对高低起伏在 1000m-2000m 以上的高山, 标准场景(20km 幅宽)内大气传播延迟变化至少为 0.4m-0.8m。由此说明, 星载 SAR 几何定标中采用逐点进行大气传播延迟改正的方法, 精度可以提升厘米到亚米的量级, 甚至更高。

(3) 不同波位的大气传播延迟影响分析

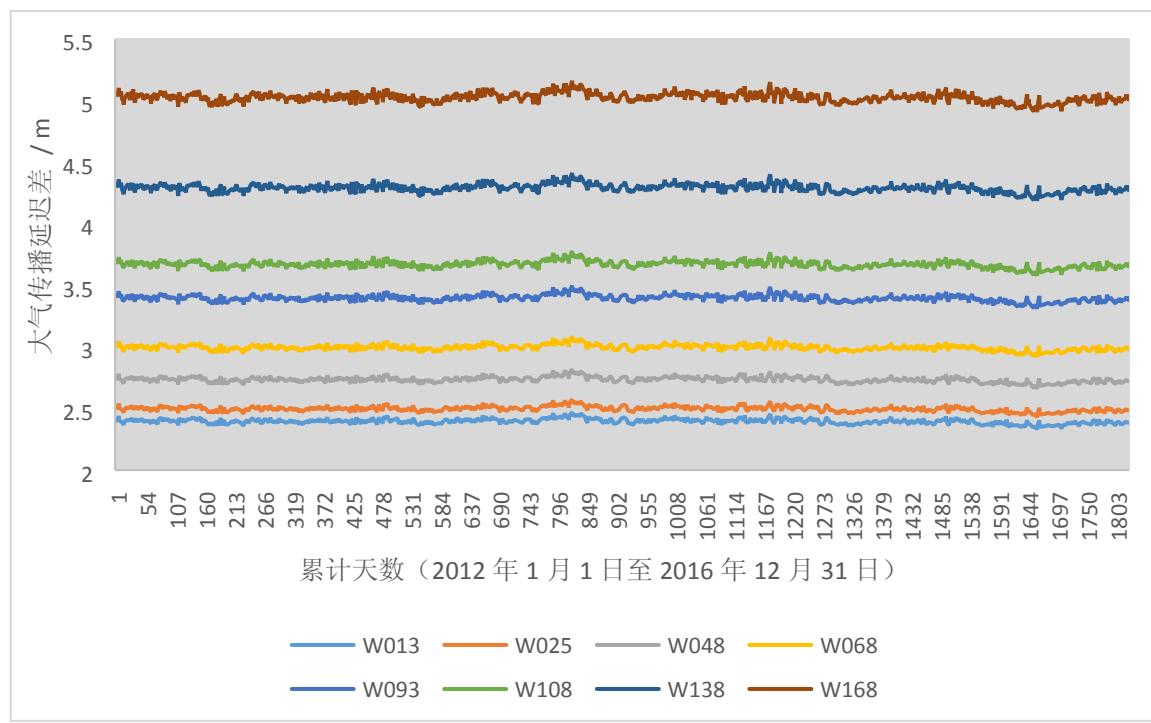
不同波位对几何定标的影响主要是大气传播延迟存在差异。针对同一场景的同一目标点，采用 8 个波位进行分析，计算得到 2012 年至 2016 年（历时 5 年）的中性大气延迟量、电离层延迟量和总的大气传播延迟量，结果如图 2.21 所示。



(a) 中性大气延迟延迟量



(b) 电离层延迟延迟量



(c) 总的大气传播延迟量

图 2.21 不同波位对大气传播延迟的影响

Fig. 2.21 Influence of different wave codes on atmospheric propagation delay

由图 2.21 可以看出, 雷达信号的大气传播延迟(包括中性大气延迟和电离层延迟)随波位的增加而变大。其中, 中性大气延迟随时间的变化趋势比较平缓, 延迟量在 2-5m 左右, 最大变化量为 0.1m, 一年中夏季的中性大气延迟比冬季的延迟量小; 电离层延迟随时间变化比较明显, 每年的四、五月份的电离层延迟出现峰值, 延迟量在 0.01-0.2m 左右, 而电离层延迟随波位变化较小, 最大差值为 0.056m, 另外 2016 年的电离层延迟影响相对较小; 总的大气传播延迟变化趋势比较平稳, 明显随波位的增大而变大, 波位间最大相差可达 2.7m 左右。

(4) 升降轨与左右侧视的大气传播延迟影响分析

在相同场景、相同波位条件下, 升降轨和左右侧视的成像模式对几何定标的影响, 主要是由于 SAR 卫星在目标场景两侧进行测量成像, 雷达信号的传播路径不同引起大气传播延迟量不同。图 2.22 和图 2.23 分别为 W108 降轨右侧视和 W108 升轨右侧视、W025 降轨右侧视和 W023 降轨左侧视在 2012 年至 2016 年(历时 5 年)期间的大气传播延迟量的差值对比图。

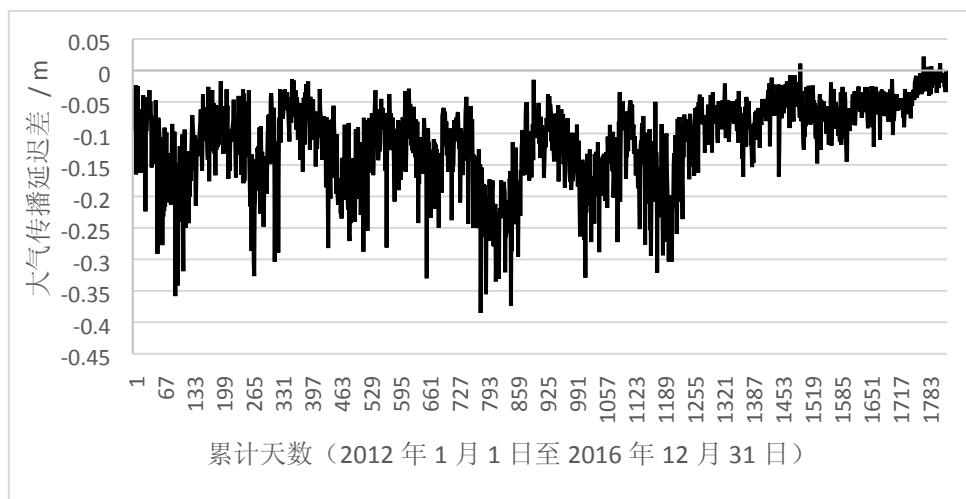


图 2.22 降轨右侧视(W108)和升轨右侧视(W108)

Fig. 2.22 Descending and right side-looking (W108) & ascending and right side-looking (W108)

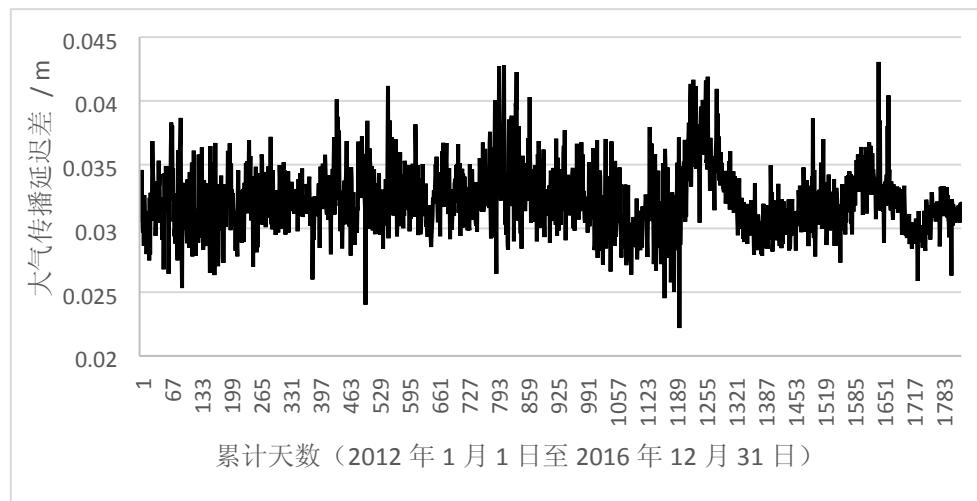


图 2.23 降轨右侧视(W025)和升轨左侧视(W023)

Fig. 2.23 Descending and right side-looking (W025) & descending and left side-looking (W023)

从图 2.22 和图 2.23 可以看出，升降轨的大气传播延迟量的差值在 0-0.38m 左右，左右侧视的大气传播延迟量的差值在 0.023-0.043m 左右。由于升降轨数据的波位较大，故此次试验的升降轨延迟量比左右侧视延迟量大。

(5) 不同场景的大气传播延迟影响分析

针对相同或相近波位、相同升降轨和相同左右侧视的条件下，分析不同场景的大气传播延迟对几何定标精度的影响。2012 年至 2016 年（历时 5 年）期间，相同波位、相同升降轨和左右侧视成像模式的大气传播延迟量的对比结果如图 2.24 所示。

从图 2.24 可以看出，不同场景的大气传播延迟量大约为 0.05-0.35m 左右，且大气传播延迟的变化量随波位的增大而变大，最大差值可达 0.341m。

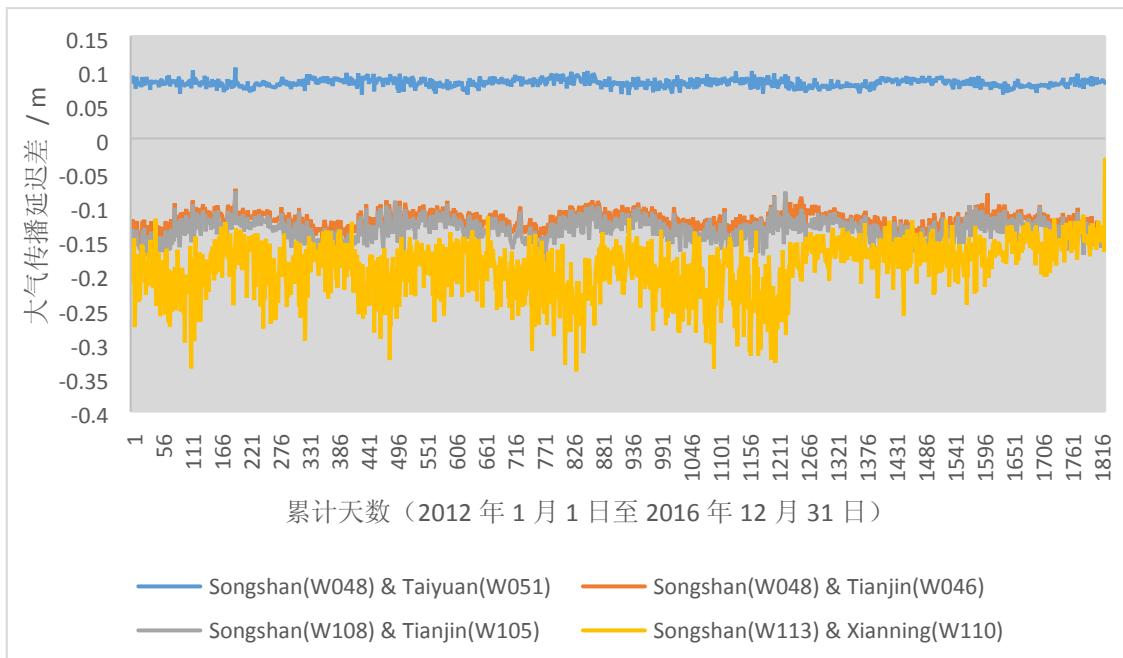


图 2.24 不同场景、相同/相近波位的大气传播延迟差异

Fig. 2.24 Atmospheric propagation delay difference for different scenes

2.6 本章小结

本章首先详细分析了星载 SAR 几何定位误差影响因素，以及误差对几何定位的影响。其次，构建了星载 SAR 卫星严密几何模型和通用几何模型，研究了星载 SAR 几何模型的解算方法，并提出了一种改进的 RD 模型数值解法，有效解决斜视成像条件下 RD 定位模型数值解法无解的问题。再次，针对国产 SAR 卫星的 RPC 模型拟合严密几何模型精度不高的问题，通过研究星载 SAR 卫星的虚拟重成像方法，有效地提升了 RPC 模型的拟合精度。然后，提出了顾及大气传播延迟的 SAR 卫星多模式几何定标方法。采用美国 GLAS 卫星大气传播延迟模型和 NCEP 的大气分析模型，消除时变误差对 SAR 卫星几何定标的影响；采用雷达信号时宽、带宽多模式混合 SAR 几何定标方案，准确标定出 SAR 卫星的几何定标参数，提升 SAR 卫星的定位精度。最后，利用国产 SAR 卫星数据，验证了虚拟重成像方法的有效性，分析了不同成像条件下雷达信号的大气传播延迟影响。

3 星载 SAR 影像高精度控制点获取

高精度地面控制点的获取是星载 SAR 几何定标的关键，也是 SAR 影像几何校正以及几何相关应用的重要处理环节。通常情况下，作为控制点的地面参照物主要有：人工角反射器、永久固定的强散射点和典型地物特征点等。

3.1 高精度角反射器点获取方法

由于人工角反射器在 SAR 图像上形成很强的亮度区，易于准确获取像点中心坐标，通常作为高精度地面控制点用于星载 SAR 的几何定标和高精度几何处理等研究。但是，布设人工角反射器需要大量的人力、物力和财力，很难实现 SAR 卫星系统性能的长期监测、周期性定标和更新定标参数等业务化运行工作。随着 SAR 卫星寿命的延长和对 SAR 影像应用范围及深度的拓展，对 SAR 系统和影像质量的要求越来越高，因此，对自动化、常态化的 SAR 系统状态监测和周期性的定标需求越来越迫切。

本文针对这一需求，设计研发了一种自动角反射器设备，具备远程控制角反射器指向的功能，实现全天时全天候、无人值守的工作模式。同时，考虑了角反射器的材料、形状、尺寸、加工误差以及指向精度等对雷达横截面（Radar Cross-Section, RCS）的影响，确保了角反射器点的成像效果；通过对整个装置的结构、角反射器顶点坐标的动态补偿以及角反射器法线的磁北方向补偿等进行精细设计，提高了角反射器的定位位置精度；分析了角反射器点的亮度特性，研究了高精度角反射器点提取的算法，为高精度控制点获取奠定基础。

3.1.1 自动角反射器设备设计

(1) 总体设计

人工布设角反射器时，根据地质罗盘测量的角度，以角反射器顶点为中心调整方位角和俯仰角，使其法线方向与电磁波的入射方向保持一致。图 3.1 为角反射器的方位角和俯仰角示意图，三角体 $O-ABC$ 为角反射器， E 为底座边的中点， $\angle EOB$ 为俯仰角， $\angle FOG$ 为方位角。实际上就是对角反射器进行水平方向和垂直方向的转动。根据这种思路，本文设计研制一种可远程控制的常态化定标设备——自动角反射器，固定安装于地面，能够根据远程短信指令自动调整姿态对准 SAR 卫星的照射方向，实现无人值守，如图 3.2 所示。

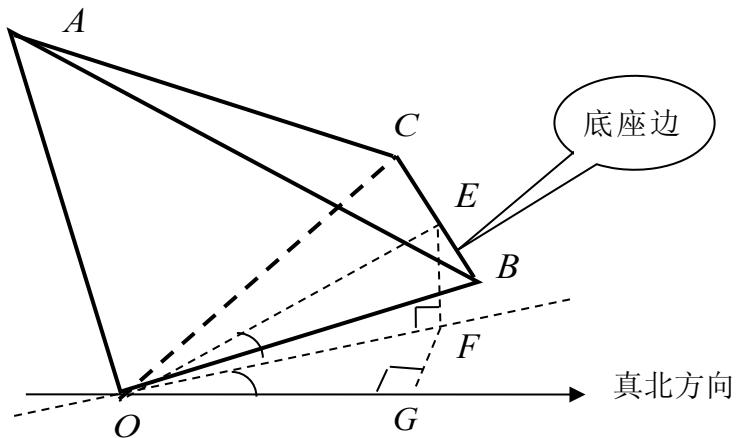


图 3.1 角反射器方位角和俯仰角示意图

Fig. 3.1 Schematic diagram of azimuth angle and pitch angle of corner reflector



图 3.2 自动角反射器设备实地效果图

Fig. 3.2 Field effect diagram of automatic corner reflector

自动角反射器设备主要包括硬件和软件两个部分。

主要硬件有：高精度三角反射器、伺服传动系统、工控机、远程终端控制系统(Remote Terminal Unit, RTU)模块、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)模块、电子罗盘、远程服务器、太阳能和风能协同供电系统、天线罩等。

软件有：方位角和俯仰角计算软件、角反射器顶点坐标补偿软件以及网页形式的远程控制监测平台软件。

设备整体结构设计图，如图 3.3 所示。

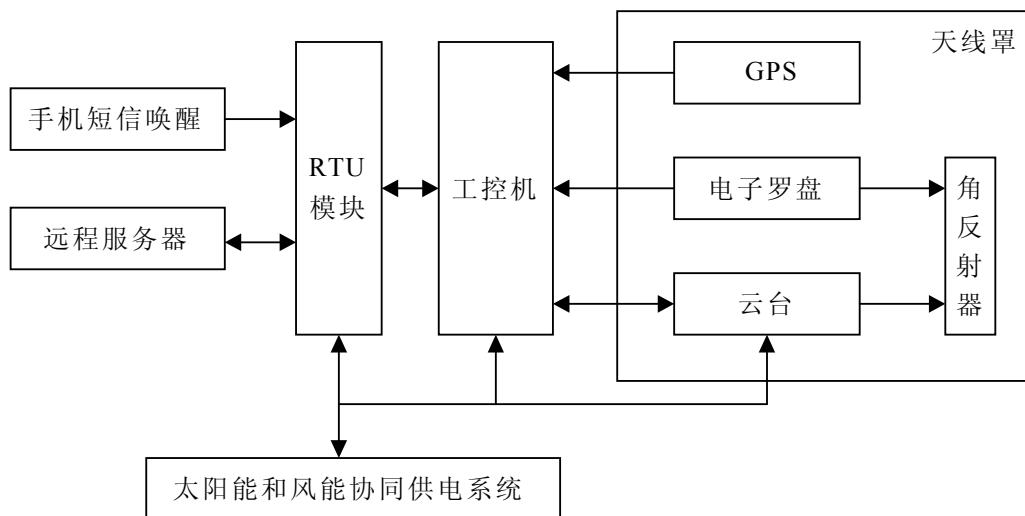


图 3.3 设备整体结构设计图

Fig. 3.3 Design diagram of equipment overall structure

运行过程：首先利用手机短信唤醒功能，使太阳能与风能协同供电系统为 RTU 模块供电，进而通过远程控制监测平台为工控机和云台等整个系统供电。通电后，对系统的硬件进行全面自检，确认无误后，进入正常的工作状态。根据卫星的轨道倾角、入射角以及当地的纬度，计算出卫星过境时角反射器的方位角和俯仰角，再利用系统角度和地理角度转换计算软件，计算出相应的云台系统方位角和俯仰角。然后，将这些指令信息通过远程服务器发送给终端，RTU 模块天线接收到信号后，解译信号给工控机，进而控制云台带动角反射器转动，使角反射器的法线对准 SAR 卫星的雷达波束方向。同时，可通过 GPS 和电子罗盘监测角反射器的位置信息和姿态信息。

(2) 硬件参数设计

①高精度角反射器

在 SAR 影像上，角反射器具有很大的反射强度和很高质量的相位^[143]。而反射强度的大小和相位的质量主要由 RCS 来决定，尤其是在 SAR 的辐射定标和几何定标过程中，角反射器的 RCS 直接影响定标精度。然而，角反射器的 RCS 与其材料、形状^[144-146]、尺寸^[147, 148]等有关，且角反射器加工制作中的误差也会造成 RCS 误差^[144, 149, 150]。因此，制作高精度角反射器需对这些参数进行详细设计考虑。

表 3.1 不同分辨率和波长对角反射器的尺寸需求

Tab. 3.1 Requirement of corner reflector size for different resolutions and wavelengths

分辨率/m	RCS/dB	波长 L,S,C,X/m	直角边长/m
0.1	10	L 0.15-0.3	0.191-0.271
		S 0.075-0.15	0.135-0.191
		C 0.0375-0.075	0.096-0.135
		X 0.025-0.0375	0.078-0.096
		Ka 0.00749-0.0113	0.043-0.053
0.3	19.54	L 0.15-0.3	0.332-0.469
		S 0.075-0.15	0.234-0.332
		C 0.0375-0.075	0.166-0.234
		X 0.025-0.0375	0.135-0.166
		Ka 0.00749-0.0113	0.074-0.091
0.5	28.49	L 0.15-0.3	0.555-0.785
		S 0.075-0.15	0.392-0.555
		C 0.0375-0.075	0.277-0.392
		X 0.025-0.0375	0.227-0.277
		Ka 0.00749-0.0113	0.124-0.152
1	30	L 0.15-0.3	0.605-0.856
		S 0.075-0.15	0.428-0.605
		C 0.0375-0.075	0.303-0.428
		X 0.025-0.0375	0.247-0.303
		Ka 0.00749-0.0113	0.135-0.166
3	39.54	L 0.15-0.3	1.048-1.483
		S 0.075-0.15	0.741-1.048
		C 0.0375-0.075	0.524-0.741
		X 0.025-0.0375	0.428-0.524
		Ka 0.00749-0.0113	0.234-0.288
5	43.98	L 0.15-0.3	1.354-1.914
		S 0.075-0.15	0.957-1.354
		C 0.0375-0.075	0.677-0.957
		X 0.025-0.0375	0.553-0.677
		Ka 0.00749-0.0113	0.302-0.372
10	50	L 0.15-0.3	1.914-2.707
		S 0.075-0.15	1.354-1.914
		C 0.0375-0.075	0.957-1.354
		X 0.025-0.0375	0.782-0.957
		Ka 0.00749-0.0113	0.428-0.525
25	57.96	L 0.15-0.3	3.027-4.281
		S 0.075-0.15	2.140-3.027
		C 0.0375-0.075	1.513-2.140
		X 0.025-0.0375	1.236-1.513
		Ka 0.00749-0.0113	0.676-0.831

由于角反射器的尺寸设计主要与 SAR 卫星的波长、分辨率等参数相关，因此，本文将从角反射器尺寸设计方面进行详细分析。

角反射器信杂比是角反射器尺寸设计的关键因素，其计算公式如下，

$$\text{角反射器信杂比}(dB) = \text{角反射器RCS}(dB) - 10\log(\text{分辨率} \times \text{分辨率}) - \text{背景后向散射系数}(dB) \quad (3.82)$$

角反射器信杂比一般要求大于 25dB。在背景均匀的情况下，可假设背景后向散射系数较小，这里设为 -5dB（考虑到内蒙古草原地区背景均匀，背景后向散射系数一般在-10dB~0dB 之间）。可以得到 RCS 与影像分辨率之间的关系，即，

$$\sigma = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2} = \frac{16\pi b^4}{3\lambda^2} \quad (3.83)$$

式中， a 为角反射器斜边长， b 为角反射器直角边长， λ 为雷达波长。

针对几种典型 SAR 系统的分辨率和波长，根据式(3.82)和式(3.83)可知，所需的角反射器 RCS 和直角边长的参数信息如表 3.1 所示。

考虑目前在轨运行的、优于 3 米分辨率的 X 和 C 波段的卫星，直角边为 1 米的角反射器可以满足几何定标需求。从表 3.1 可以看出，1 米直角边的角反射器，可以满足优于 3 米分辨率的 L 波段 SAR 卫星、优于 3 米分辨率的 S 波段 SAR 卫星、优于 10 米分辨率的 C 波段和 X 波段 SAR 卫星、优于 25 米分辨率的 Ka 波段 SAR 卫星；1.5 米直角边的角反射器，可以满足优于 10 米分辨率的 S 波段 SAR 卫星、优于 25 米分辨率的 C 波段和 X 波段 SAR 卫星、优于 25 米分辨率的 Ka 波段 SAR 卫星。

②伺服传动系统

伺服传动系统主要由两个电机组成，电机接收到控制器的信号，分别负责水平和垂直方向的转动。其指向误差将导致雷达波的入射角偏离最大 RCS 方向，因此需要对伺服传动系统的指向精度等进行考虑。

调整角反射器姿态，主要是水平方向和垂直方向的转动。对于水平方向的转动，为了满足不同轨道倾角 SAR 卫星的常态化定标需求，自动角反射器应可以实现 360° 水平方向连续旋转；对于垂直方向的转动，考虑一般 SAR 卫星的入射角为 10° ~ 60°，那么角反射器的法线方向与水平面的夹角需满足 30° ~ 80°。其中，角反射器法线方向与底面存在固定夹角（约为 35.27°），加上角反射器的底面与水平方向的设计安装夹角，可以推算出伺服传动系统所需的垂直旋转角度范围。

电磁波入射方向偏离角反射器法线方向越大，RCS 减小的越多，其中俯仰角的变化对 RCS 的影响比较敏感。以边长为 10λ 的角反射器为例，当俯仰角和方位角偏差均为 1° 时，RCS 的误差优于 0.15dB ；当俯仰角和方位角偏差均为 0.5° 时，RCS 的误差优于 0.05dB ^[144]。

人工布设角反射器的指向精度控制在 1° 左右是比较容易的，基本可以满足 SAR 定标等应用需求。然而相比人工控制，机械控制的精度和稳定性较高。目前，伺服传动系统的相对指向精度可以达到 0.01° ，降低了电磁波入射方向偏离角反射器法线方向对 RCS 的影响。

③天线罩

为了实现远程控制、无人值守的工作模式，角反射器经常露天将会受到自然界中暴风雨、冰雪、沙尘以及太阳辐射等的侵袭，致使角反射器的反射精度降低、寿命缩短。

天线罩采用玻璃钢材质的球形结构，具有良好的电磁辐射透过性能，在结构上能经受外部恶劣环境的作用，起到重要的防护作用。因此，天线罩不仅可以保护自动角反射器系统免受风雨、冰雪、沙尘和太阳辐射等的影响，使自动角反射器系统工作性能比较稳定可靠，还可以同时减轻角反射器的磨损、腐蚀和老化、风负荷和风力矩，延长使用寿命可以消除减小转动角反射器的驱动功率。

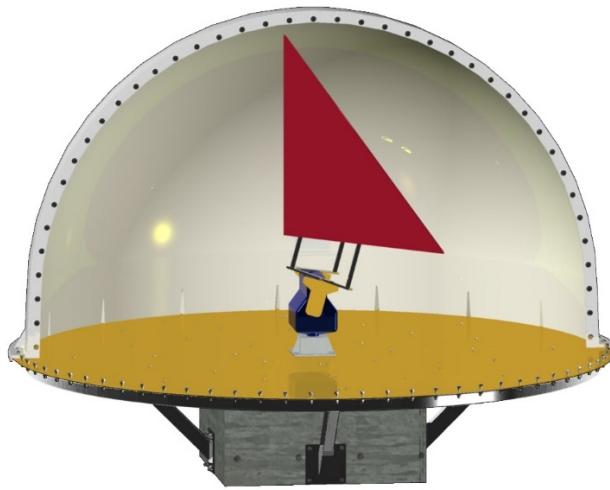


图 3.4 天线罩设计效果图

Fig. 3.4 Design sketch of radome

以 1m 直角边大小的自动角反射器为例，根据其最大转动范围，天线罩可以采用 3m 直径的半球状（如图 3.4 所示）。为了尽量减少天线罩对电磁波的干扰，采用高强环氧乙烯基树脂材料，要求天线罩外表面平滑光亮、无气泡、针眼、龟裂、胶衣剥落缺陷及杂质，

达到双程损耗 $\leq 0.4dB$ 、天线罩间的相对损耗误差 $\leq 0.15dB$ 的要求。并具有设备检查舱门，以便日常勤务检查、设备维修、更换角反射器，适应不同定标任务。

(3) 软件功能实现算法

关于方位角和俯仰角计算软件的实现算法，详细见参考文献[151]，本文不再赘述。下面主要介绍角反射器顶点坐标补偿软件的实现算法。

角反射器由于结构特点，产生角反射效应，将入射的雷达波束经过几次反射后，以与入射平行的方向返回，如图 3.5 所示。由此形成很强的回波信号，在 SAR 影像中形成十字形的亮点。

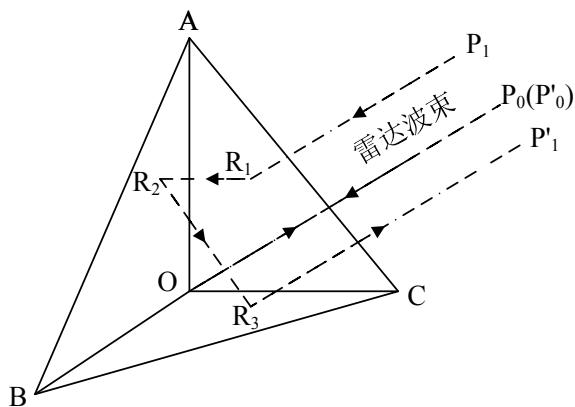


图 3.5 角反射器工作原理示意图

Fig. 3.5 Schematic map of corner reflector operational principle

由于角反射器法线方向的后向散射能力最强，且稳定，通常将角反射器的法线方向与雷达波束的入射方向保持一致，以便在 SAR 影像中清晰地识别角反射器点，用于几何定标和辐射定标等工作。其中，角反射器的法线方向是角反射器顶点 O 与三角面 ABC 中心的连线方向。由于星载 SAR 系统位于角反射器的远场，雷达波束可以近似认为是平行照射角反射器，如图 3.5 所示。与角反射器法线方向相同的雷达入射波束，经角反射器反射后沿原路径返回，此时的后向散射能量最强；其余方向的雷达入射波束，经角反射器多次反射后，沿与入射平行的方向返回，后向散射能量随偏离法线方向的距离增大而减弱。在 SAR 影像中，角反射器呈现的十字形亮点，且十字中心处的像素值最大，也是角反射器点的相位中心。由此说明，角反射器的相位中心是雷达波束在角反射器的法线方向处反射而产生的，即角反射器的顶点就是相位中心。

实际摆放角反射器时，很难准确地将角反射器的法线方向对准雷达波束入射方向，即波束方向 P_0O 与角反射器法线方向存在一定的角度偏差。但入射波束 P_0O 经角反射器反射后，沿原路返回，即 P_0O 与 P'_0O 重合；其余入射波束（如 P_1R_1 ）经角反射器多次反射后，沿平行于入射方向 $R_3P'_1$ 返回。此时，波束 P_0O 的后向散射能量较角反射器法线方向的后向散射能量弱，但相对于其它波束方向，后向散射能量仍是最强的。在 SAR 影像中，十字中心的最大像素值主要是波束 P_0O 方向贡献的，也就是说，角反射器顶点仍是相位中心。综上，SAR 影像中角反射器点的相位中心对应于角反射器的顶点，需要准确测量角反射器顶点坐标，作为 SAR 影像的控制点。

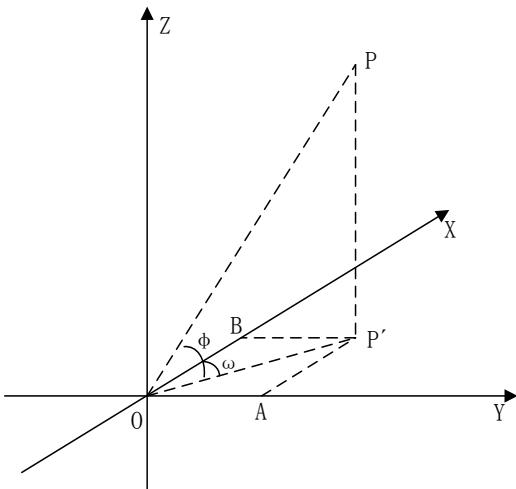


图 3.6 自动角反射器顶点坐标补偿示意图

Fig. 3.6 Sketch map of vertex coordinate compensation for automatic corner reflector

由于自动角反射器设备在水平和垂直方向上转动，其顶点位置会随着方位角和俯仰角的变化而变化。为了获取角反射器顶点的精确地面坐标，需要对角反射器顶点的坐标进行补偿修正。假设以云台垂直方向的转动轴中心为坐标系原点，以真北方向为坐标系的 X 轴，建立左手直角坐标系 O-XYZ，如图 3.6 所示。其中，P 为角反射器顶点，P' 为 P 在 XOY 平面的投影，P'A 和 P'B 分别为 P' 到 Y 轴和 X 轴的距离， ω 为点 P 的方位角， φ 为点 P 的俯仰角。

根据高斯投影的方法，将地面控制点 WGS-84 系下的大地坐标 (Lat_0, Lon_0, H_0) 转换成高斯平面坐标 (x_0, y_0, H_0) 。由此可知，坐标系原点坐标 O 为 $(x_0, y_0, H_0 + h)$ ，点 P 的高斯平面坐标为 $(x_0 + PO \times \cos \varphi, y_0 \times \cos \varphi \times \sin \omega, H_0 + h + PO \times \sin \varphi)$ 。在根据高斯投影关系，反算出点 P 在 WGS-84 系下的大地坐标 (Lat_p, Lon_p, H_p) ，即获得高精度角反射器顶点坐标。

(4) 自动角反射器设备的优化布设

自动角反射器设备的优化布设主要需要考虑布设环境、SAR 卫星的成像幅宽和 SAR 卫星的升降轨模式等。

对于自动角反射器设备的布设环境需求具体如下：

- 1) 自动角反射器设备应尽量安置在背景反射特性较弱的地方，远离可能发生透视收缩、阴影和叠掩等现象的地方，以便于在 SAR 影像中可以精确提取其位置；
- 2) 自动角反射器设备安装时应尽量远离容易产生多次反射的物体（如房角、雕塑、废弃建筑材料等），一般要远于 500 m；
- 3) 自动角反射器设备安装时应尽量远离强反射物体（如电线塔、通信塔等）；如非要在其附近安装，尽量将自动角反射器设备与强反射体之间保持南北方向进行安装。
- 4) 降低设备底座等其他部件对雷达信号后向散射的影响；
- 5) 交通便利，通讯信号好；
- 6) 最好有气象观测台之类，气象参数易于收集；

为了使有限的自动角反射器设备发挥最大的使用效率，考虑 SAR 卫星影像的成像幅宽和升降轨模式，参照 DLR 在德国建立定标场的设计模式^[28]（如图 3.7 所示），进行自动角反射器设备的优化布设。

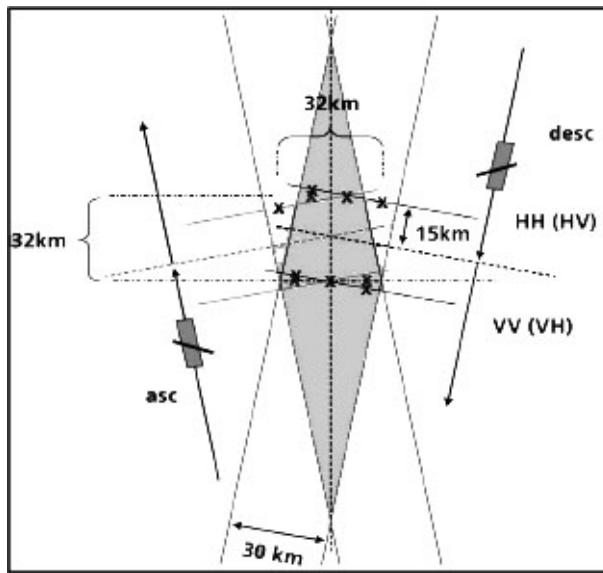


图 3.7 自动角反射器设备优化布设示意图^[28]

Fig. 3.7 Sketch Map of the optimizing arrangement of automatic corner reflector

以 30km 成像幅宽的 SAR 卫星为例, 如图 3.7 所示, 灰色重叠区域即为 SAR 卫星升降轨两次拍摄的相同区域。因此, 在灰色重叠区域布设 4-5 台自动角反射器, 即可满足 SAR 卫星无论是升轨模式还是降轨模式拍摄该地区, 每景 SAR 影像均可获得至少 4 个控制点以满足常态化几何定标的需求。

3.1.2 高精度角反射器点像素坐标提取算法

角反射器在几何检校场正确安装后, 就需要在影像上精确提取角反射器的位置。由于 SAR 几何定标的前提是坐标精确已知的地面角反射器的支持, 核心是地面角反射器在 SAR 影像上位置的精确获取。

地面角反射器的大地坐标及其对应 SAR 影像像点坐标能否准确快速获取直接影响着星载 SAR 影像几何定标的效率和精度。经典的角反射器对应像点位置获取方式大多数情况下是通过人工目视解译采集, 然而原始 SAR 影像受制于分辨率的限制或者细节的不够清晰, 导致难以精确提取角反射器像点位置。为此, 可以通过影像放大的方式来辅助人工目视解译, 进而获取角反射器像点位置。但其结果是导致人的视觉不连续、破坏感兴趣区域与背景信息的连续性, 影响了人工选取控制点的效率和精度。

基于这一问题, 研究了一种可实现亚像元精度的角反射器点提取方法。在精密测量系统中, 获取小像点的精确位置具有重大意义, 并取得了广泛的应用。测量目标像点位置将会由于探测器的分辨率有限造成一定的精度限制, 可利用目标像点的灰度分布特性, 通过内插细分算法确定出目标像点位置, 从而使测量精度可以达到亚像元级。常用的细分算法有质心法、加权质心法、高斯面拟合法、抛物面拟合法等, 它们都是通过构造一个尽可能精确反映目标区域像素灰度值位置和目标像点的质心位置之间关系的数学模型, 从而实现对像点位置的精确估计。

本节首先分析角反射器在 SAR 图像上的辐射特性, 在此基础上采用质心法研究亚像元提取技术详细算法, 通过采用不同的数学细分插值模型, 比较 SAR 图像上角反射器的提取精度。

(1) 角反射器点特性分析

当雷达波的入射方向保持最佳的夹角, 其反射强度通常远大于周围物体的反射; 角反射器大部分是用金属材料制成, 可以看作一个点状目标的人造永久散射体, 其在影像上往往表现为一块十字形亮点, 如图 3.8 所示。

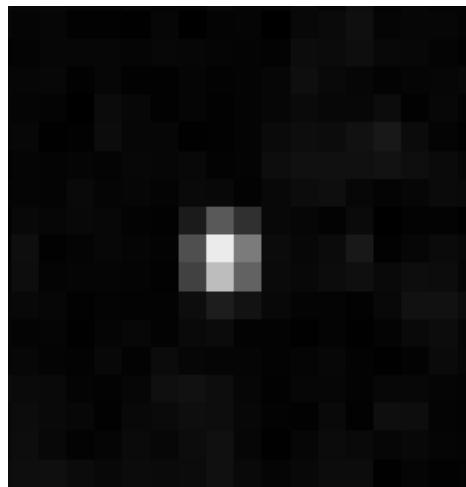


图 3.8 角反射器点在 SAR 影像上的效果

Fig. 3.8 Imaging effect of corner reflectors in SAR image

如图 3.8 所示, 角反射器所在位置的亮度值远远大于周边环境亮度值, 而且常常能对周边 8-邻域的像素值都有一定的影响。其中心最亮点周边 8-邻域和 24-邻域范围像素值如表 3.2 所示。

表 3.2 角反射器点邻域像素值

Tab. 3.2 Pixel value around the point of corner reflector

80	175	159	73	154
54	519	1705	923	172
74	1518	4505	2361	219
55	1250	3626	1890	207
61	256	561	348	167

从表 3.2 可以看出, 角反射器反射信号极强, 并且对其周边 8-邻域内的像素都有很大影响, 使其周边位置灰度值非常明显的高于背景值。

从信号处理的角度来看, 地物特征点的提取精度取决于背景噪声、带宽和特征的清晰度。由于角反射器点的强散射特性, 比较容易精确确定其在 SAR 影像中的相位中心, 提取精度比其他地物高, 常用于 SAR 影像的几何定标和辐射定标。在 SAR 影像中, 角反射器呈现的是 SAR 系统的脉冲响应函数特征, 即典型的 sinc() 函数形状。角反射器点在噪声影像中提取精度可以表示为^[139, 152] ,

$$\sigma_{point} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{1}{\sqrt{SCR}} \approx \frac{0.55}{\sqrt{SCR}} \quad (3.84)$$

式中，SCR 是信号与背景杂波（包括噪声）的功率比，提取精度 σ_{point} 的单位是像素。角反射器的后向散射功率主要取决于角反射器大小、形状、材料、加工误差、雷达波长和波束入射角度（相对于角反射器的方位角和俯仰角）等，而背景杂波主要取决于角反射器周围的地表粗糙程度。通常，SCR 可以通过角反射器点周围区域利用点目标分析法进行测量。

（2）角反射器点坐标提取

对于 SAR 遥感影像而言，其几何定标需要获得精确的地面对应角反射器坐标和其对应的 SAR 原始影像像点坐标，本文采用亚像元精度技术中的质心法，其理论依据是：目标图像灰度的轮廓和信噪比影响目标点质心的定位精度，可以在目标成像区域内增加一些可利用的点，通过一定的插值方法（如：二次线性内插，sinc 函数内插等），来提高质心定位的精度。

亚像元方法是利用目标像点的灰度分布特性，通过内插细分算法使测量精度可以达到亚像元级，从而获得精确的目标像点位置。它是通过构造一个尽可能精确反映目标区域像素灰度值位置和目标像点的质心位置之间关系的数学模型，从而实现对像点位置的精确估计。为了提高求得的质心位置的精度，需要将读入的图像进行细分，通过对图像各点的灰度值的插值，得到插值曲线，求得细分后各点的灰度值。根据不同的精度要求，图像细分比例可取 0.1、0.01、0.001 等。

其算法具体步骤如下：

- 1) 通过 SAR 图像间接定位模型，由地面大地坐标计算其对应的 SAR 图像像点坐标，间接定位模型具体算法见本文 SAR 影像内定标算法，在由影像地面点坐标和轨道参数获得该地面点对应的方向向时间和该点的星地距离后，再解算该点对应的行列号。
- 2) 在步骤 1) 中计算的行列号附近区域（如 10*10 像素），通过计算机寻找在此区域像素灰度值最大的亮点，再通过人工目视判读，比较周围地物，确定该点是否为角反射器在 SAR 图像上的粗略位置，初步确定角反射器的粗位置。
- 3) 以步骤 2) 中的粗位置所对应像素值为中心，选取一邻域（例如选取 5×5 领域）为目标质心寻找区。将该领域内所有像点对应的坐标和灰度强度信息按顺序提取出来，并把该灰度赋予每个像素的几何中心，例如对像素坐标点（8000, 5000），其中心（7999.5, 4999.5）的灰度为该像素的灰度大小。

4) 对该目标区内每一像素进行的细分，细分尺寸根据不同的精度要求可以是 10×10 或 100×100 或 1000×1000 ，当细分尺寸为 10×10 时，插值点步长为 0.1，它的精度即可达到 0.1 个像素。采用一定的数学函数方法求得每一细分点的灰度。

5) 计算图像回波强度质心。

在计算质心时，采用逐行分析计算，取平均值法计算质心，其实现原理为：

对目标区域，逐行对像素图像（行列都以细分后单位为基准，如细分尺寸为 100×100 ，则行列基本单位为原图像的 0.01，即 0.01 行/列）进行处理（包括插值、图像分割、质心计算等），并求出每一行的质心坐标和平均灰度值，质心坐标也就是 X 轴方向坐标，最后将每一行的（取决于图像的高度）质心坐标求平均值，即得原图像质心位移。

求每一行质心的坐标公式为：

$$X_c = \frac{\sum_{k=1}^n x_k I_k + \sum_{u=1}^m x_u f(u)}{\sum_{k=1}^n I_k + \sum_{u=1}^m f(u)} \quad (3.85)$$

式中， n 为被插值点的个数， m 为细分后点的个数， I_k 为被插值点的灰度值， $f(u)$ 为细分后点的值。

然后，以每一行质心坐标和对应灰度值为参数，求整个目标区的质心公式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} X_c = \frac{\sum_{u=1}^m \bar{x}_u \bar{f}(u)}{\sum_{u=1}^m \bar{f}(u)} \\ Y_c = \frac{\sum_{u=1}^m y_u \bar{f}(u)}{\sum_{u=1}^m \bar{f}(u)} \end{array} \right. \quad (3.86)$$

式中， \bar{x}_u 为每一行质心坐标， $\bar{f}(u)$ 为对应平均灰度值。

计算得到的 (X_c, Y_c) 即为目标区域的质心，也即角反射器对应的图像像素坐标。计算质心时，根据插值点步长（如有效步长为 0.001）的选取和像素的计算精度要求，精度取到 0.0001 即可。

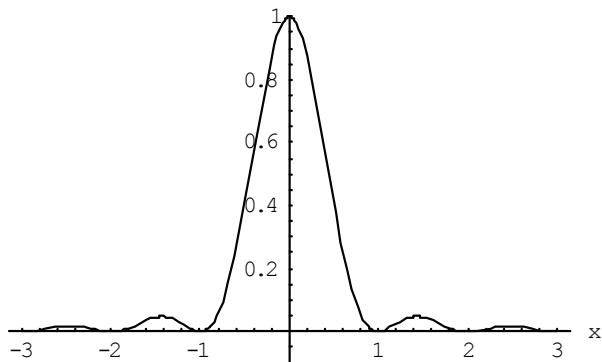
细分插值运算是根据数据的分布规律，找到一个既可以连接已知的各点、又可以预测两点之间任意位置上函数值的函数表达式。下面介绍两种常用的细分插值数学模型，辛克 (sinc) 函数采样和双线性插值函数。

1) sinc 函数采样

如图 3.9 所示的 sinc 函数是理想的重采样函数, 相应点对其原点 O 处亮度贡献的权通过其横轴上各点的幅值表示。sinc 函数的定义为:

$$\text{Sinc}^2(x) = \left[\frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \right]^2 \quad (3.87)$$

该分布和某些类型实例相符, 例如对于夫琅和费狭缝衍射, 像面上的光强就遵从 Sinc^2 函数分布, 该函数形状如图 3.9 所示。

图 3.9 Sinc² 函数Fig. 3.9 Function of Sinc²

2) 双线性插值函数

如图 3.10 所示:

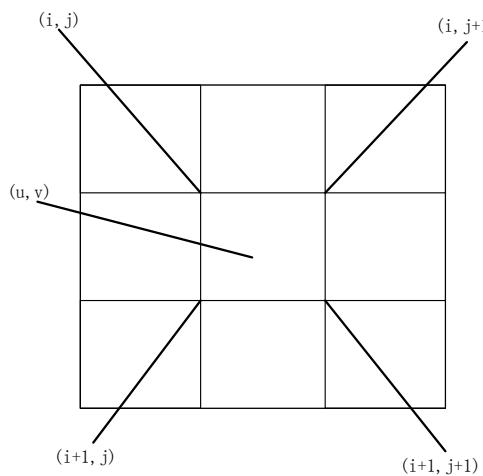


图 3.10 双线性插值

Fig. 3.10 Bilinear interpolation

点 (u, v) 的灰度可以通过三次插值得到，首先根据 (i, j) 和 $(i+1, j)$ 这两点的灰度值 $f(i, j)$ 和 $f(i+1, j)$ 插值得：

$$f(u, j) = f(i, j) + \alpha [f(i+1, j) - f(i, j)] \quad (3.88)$$

然后根据 $(i, j+1)$ 和 $(i+1, j+1)$ 两点的灰度值 $f(i+1, j)$ 和 $f(i+1, j+1)$ 插值得：

$$f(u, j+1) = f(i, j+1) + \alpha [f(i+1, j+1) - f(i, j+1)] \quad (3.89)$$

最后根据 (u, j) 和 $(u, j+1)$ 这两点的灰度值 $f(u, j)$ 和 $f(u, j+1)$ 插值得：

$$\begin{aligned} f(u, v) = & (1-\alpha)(1-\beta)f(i, j) + \alpha(1-\beta)f(i+1, j) \\ & + (1-\alpha)\cdot\beta\cdot f(i, j+1) + \alpha\beta\cdot f(i+1, j+1) \end{aligned} \quad (3.90)$$

式中， $f(u, v)$ 即为该插值点的灰度值。

3.2 基于光学遥感影像的控制点获取

对于不能获取角反射器点的星载 SAR 影像，可以选取星载 SAR 影像和光学影像的同名像点，通过光学遥感影像的数字正射影像（Digital Orthophoto Map, DOM）产品和 DEM 产品为参考数据获取同名像点的三维坐标，实现星载 SAR 影像的控制点提取。由于星载 SAR 影像和光学影像的影像纹理和成像机理存在较大差异，故同名像点（即控制点）的选取是非常困难的。

根据星载 SAR 影像和光学影像的特点，总结归纳得出以下几个选取星载 SAR 影像和光学影像间同名像点的原则：

（1）选择两条道路中心线的交点，如道路的“十”字交叉口或“T”字交叉口。由于道路在星载 SAR 影像中是漫反射背景，道路纹理较清晰，便于与光学影像的道路匹配。另外，道路交叉口的地势一般较为平坦，受高差影响较小。

（2）应选择尺寸适当的道路交叉口。由于分辨率原因，道路过窄可能导致在 SAR 影像上无法清晰识别；然而，道路过宽则影响控制点提取精度。

（3）应选择笔直的道路交叉口。由于地物散射特性和斑点噪声存在，弯曲的道路边界在星载 SAR 影像中无法清晰判读，尤其是两条路的交汇处，故尽量选择两条笔直的道路。为了提高提取精度，可根据两条路的趋势走向来确定两条道路中心线的交点。

（4）应远离高程起伏较大的区域。高程起伏会引起星载 SAR 影像变形，影响控制点提取精度，故道路交叉处的起伏或高差尽量小，天桥处的“十”字交叉口也应避免选择。

(5) 应减小道路周边地物或建筑物对控制点提取成影响。道路交叉附近的大树和建筑物可能会产生叠掩和阴影等现象，影响选点精度，故道路交叉口周围地势平坦，避免附近有房屋等的道路交叉口。

为了展示选点原则的效果，选取了西安市阎良区 YG-7 号 SAR 卫星影像和资源三号 (ZY-3) 光学卫星影像的同名点，如图 3.11 所示。其中，左侧为 YG-7 卫星影像，右侧为 ZY-3 卫星影像。

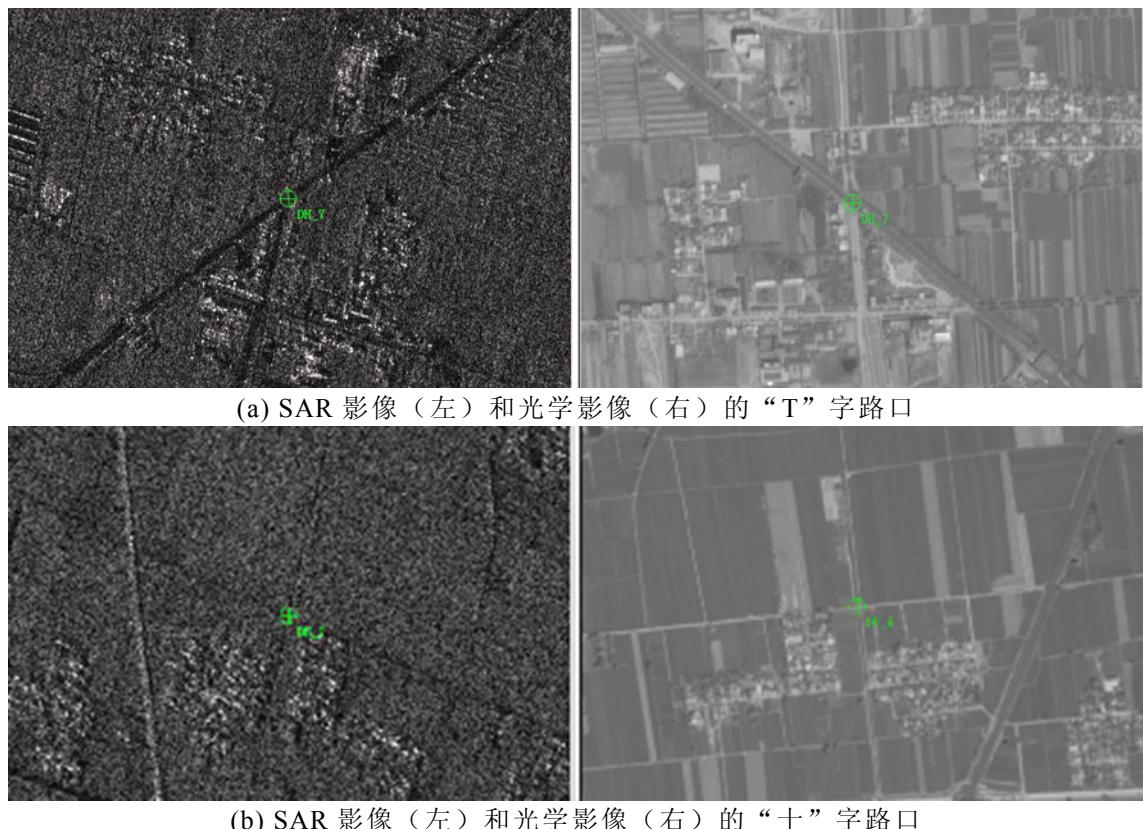


图 3.11 SAR 影像和光学影像同名点选取

Fig. 3.11 Homonymous point selection between SAR image and optical image

3.3 固体潮改正

外力作用和负荷效应以不同的时间尺度和数量级使固体地球产生变形^[139]，由此导致对于某一时间获取的地面控制点坐标在不同时间内会发生变化。为了获取成像时刻的高精度地面控制点，需消除地球变形影响。固体潮 (Solid Earth Tide, SET) 是由于太阳和月亮与地球间的引力作用使地球产生变形引起的，其径向分量可达 40 厘米，水平分量可达几

个厘米。由于极移现象，地球自转轴的变化引起的地球形变称为极潮（Pole Tides, PT），其径向分量可达 25 毫米，水平分量可达 7 毫米。海洋潮（Tidal Ocean Loading, TOL）由于海洋质量分布的潮汐变化引起地球变形，在海岸附近潮差大的地区影响最大，径向位移可达几个厘米，而内陆地区的径向位移不到 1 个厘米。海洋负荷影响对海岸附近地区的影响最大，而大气负荷影响（大气潮）对远离海洋的内陆地区影响最明显，垂直的峰值位移可达 15-20 毫米^[153]。大气负荷影响引起的每年位移幅度径向分量可达 4 毫米，水平分量通常小于 0.5 毫米^[154]。地面控制点一般选在比较平坦的内陆地区，其坐标通常采用 GNSS 接收机进行精确测量，可以获得厘米级的定位精度。综上，影响控制点精度的时变因素主要是固体潮影响，其余因素可以忽略不计。因此，在每次利用地面控制点进行几何定标和精度评价时，需消除固体潮的影响。

产生地球固体潮的引力主要来源于太阳与月球（太阳系中其它行星的引力也有所贡献，相对较小），其中月球引起的固体潮大约是太阳的两倍。由于地球与太阳和月球间轨道的周期变化，主要引起三类固体潮成分：半日潮、日潮和长周期潮。半日潮主要是指周期在半天（12 小时）左右的固体潮成分，而日潮主要是指周期在一天（24 小时）左右的固体潮成分。相比之下，半日潮引起的地壳变化幅度比日潮大。长周期潮主要是指除半日潮和日潮外的周期明显大于 24 小时的固体潮，然而长周期潮成分之间的周期差异非常大，最短周期不到两周，最长周期可长达 18 年。总之，太阳、月球与地球轨道的差异性是产生多种成分固体潮的主要原因^[155]。

在自由空间中，固体潮引起的变化可以通过标准的重力位系数 (C_{nm} 和 S_{nm}) 进行建模^[156]。固体潮对 ΔC_{nm} 和 ΔS_{nm} 的影响通过乐甫数 k 表达。对于潮汐变形，椭圆率和地球自转偏向力的影响需要利用三个 k 参数 ($k_{nm}^{(0)}$ 和 $k_{nm}^{(\pm)}$ ，除了 $n=2$) 通过球谐函数展开的阶和次表征在自由空间产生的变化。然而，对于 $n=2$ 的情况，由于质量守恒， $k_{2m}^{(-)}=0$ ，此时只需要两个参数即可^[157]。

基于重力位系数的潮汐可以通过三个步骤进行高效计算，具体计算步骤如下^[158, 159]：

步骤一，在时间域利用月球和太阳的星历表估计 ($2m$) 部分的引潮位，并针对各自的 $k_{2m}^{(0)}$ ，利用与频率无关的标称值 k_{2m} 计算相应的变化，同理可计算 3 阶和 4 阶部分；

步骤二，根据步骤一中假定为周日频段的恒定标称值 k_{21} ，修正该频段几个潮汐成分的 $k_{21}^{(0)}$ 的偏差，同理修正其余两个频段的潮汐成分；

步骤三，当采用“传统潮汐自由”模型时，如 EGM96，步骤一和步骤二可以计算出全部的潮汐成分，包括与时间无关的永久潮部分（相应的重力位系数为 \bar{C}_{20} ）；而当采用“零点潮汐”模型时，需单独计算与时间无关的部分 $\Delta \bar{C}_{20}$ ，详见文献[158]。

3.4 实验与分析

3.4.1 基于点目标仿真的角反射器点提取精度分析

根据星载 SAR 点目标仿真技术,通过对 SAR 影像上某一指定位置进行点目标仿真(即已知该点准确坐标),然后利用本文研究的高精度角反射器点提取算法提取该点目标的影像坐标,与真实坐标进行对比,即可评价本文研究的高精度角反射器点坐标提取精度。

(1) 点目标仿真

星载 SAR 系统在运动过程中以一定的脉冲重复时间 (Pulse Repetition Time, PRT) 发射和接收脉冲,对近似为一矩形区域进行成像,区域内各静止目标对入射波后向散射,雷达脉冲信号经过静止目标和天线方向图的调制后,形成具有周边环境和目标信息的星载 SAR 回波数据。为了获得可视的 SAR 影像,需要通过匹配滤波方式对目标场景进行专门成像处理。

本文采用点目标仿真算法和 Chirp Scaling (CS) 成像算法,仿真生成一个具有 25 个点目标的 SAR 影像,点目标仿真结果和相对位置关系如图 3.12 所示。其中,点目标的仿真位置已知。仿真基本参数为:载波频率为 4GHz,信号带宽为 1MHz、脉冲宽度为 200us,合成孔径长度 300m。

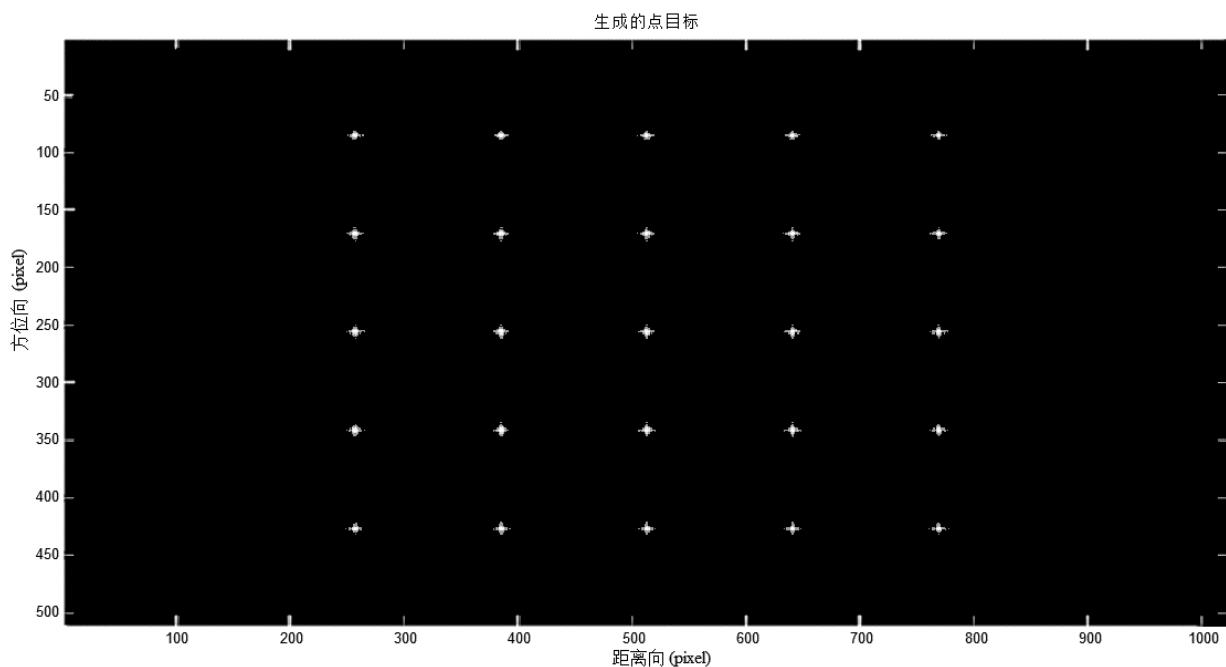


图 3.12 点目标仿真结果

Fig. 3.12 Point target simulation

图 3.12 中共计 25 个点目标，以 5 行（方位向）5 列（距离向）方式均匀分布。为便于区分每个点目标且易于对比分析各个点的提取精度，每个点的点号采用以“列+行”的形式命名，列号从左至右排序为 1~5，行号从上至下排序为 1~5。例如，左上角的点目标编号为“11”，右下角编号为“55”。

(2) 角反射器点坐标提取

利用亚像元精度的质心法进行点坐标提取，其中细分方法分别采用 sinc 函数采样和双线性插值方法，点提取结果与已知的点坐标进行对比，分析不同窗口大小、不同细分长度以及不同细分方法的点提取精度。

首先，利用 sinc 函数采样的细分方法，细分长度采用 10 和 100，窗口大小采用 3×3 、 5×5 和 7×7 ，分别对仿真的点目标进行质心法的点坐标提取，结果如图 3.13 所示。其中，横坐标为点号，纵坐标为点位误差，图例表示为“窗口大小_细分长度”，例如“3_10”表示为窗口大小为 3、细分长度为 10。

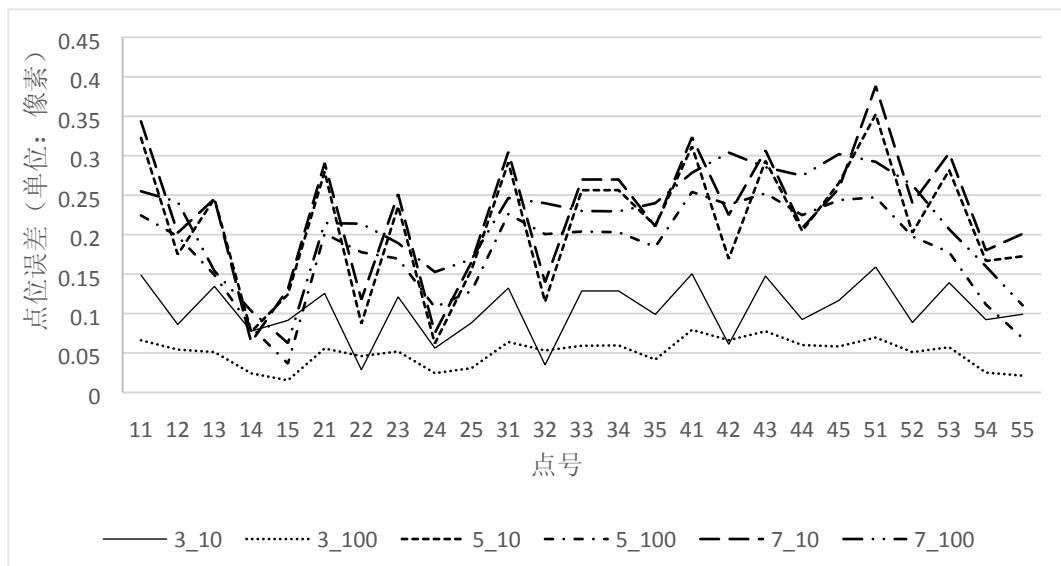


图 3.13 基于 sinc 函数采样细分法的点提取精度对比

Fig. 3.13 Precision comparison of point extraction based on sinc function sampling subdivision method

从图 3.13 可以看出，基于 sinc 函数采样细分的质心法提取目标点坐标的精度均优于 0.4 个像素，且目标点提取精度随窗口大小的增大而有所降低。当窗口大小为 3，细分长度为 100 时，该方法的目标点提取精度优于 0.1 个像素；当窗口大小为 3，细分长度为 10 时，该方法的目标点提取精度优于 0.15 个像素。由此说明，该方法在窗口大小为 3 时，目标点提取精度达到最优，可优于 0.1 个像素。

然后, 利用双线性插值的细分方法, 细分长度采用 10 和 100, 窗口大小采用 3×3 、 5×5 和 7×7 , 分别对仿真的点目标进行质心法的点坐标提取, 结果如图 3.14 所示。其中, 横坐标为点号, 纵坐标为点位误差, 图例表示为“窗口大小_细分长度”, 例如“3_10”表示为窗口大小为 3、细分长度为 10。

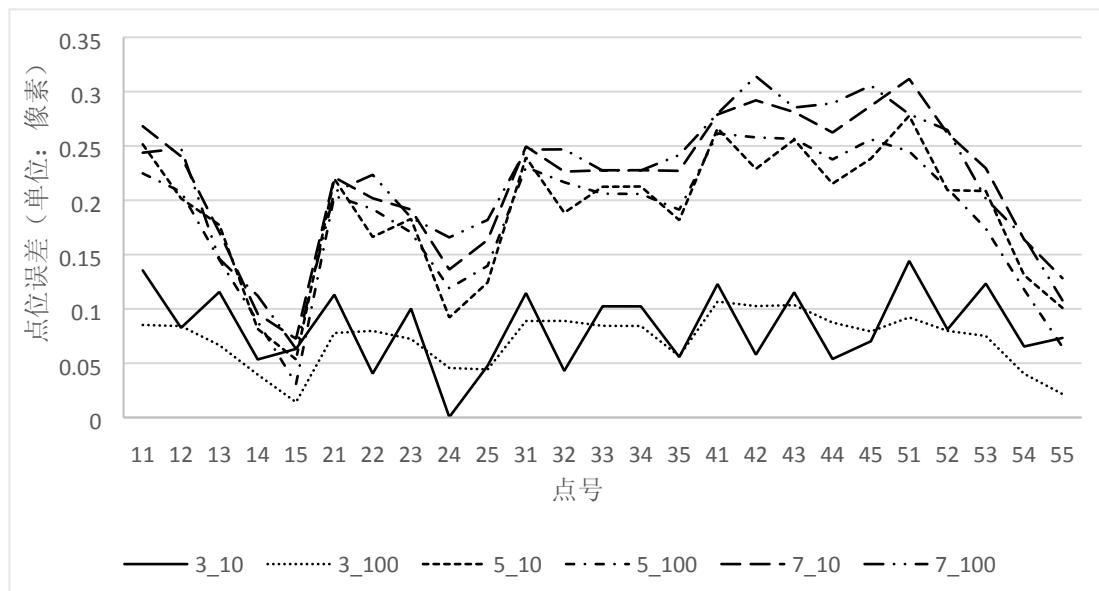


图 3.14 基于双线性插值细分法的点提取精度对比

Fig. 3.14 Precision comparison of point extraction based on bilinear interpolation subdivision method

从图 3.14 可以看出, 基于双线性插值细分的质心法提取目标点坐标的精度均优于 0.35 个像素, 且目标点提取精度随窗口大小的增大而有所降低。当窗口大小为 3, 细分长度为 100 时, 该方法的目标点提取精度优于 0.1 个像素; 当窗口大小为 3, 细分长度为 10 时, 该方法的目标点提取精度优于 0.15 个像素。由此说明, 该方法在窗口大小为 3 时, 目标点提取精度达到最优, 可优于 0.1 个像素。

最后, 针对 sinc 函数采样和双线性插值的细分方法得到的目标点提取精度进行对比, 结果如图 3.15 所示。其中, 横坐标为点号, 纵坐标为点位误差, 图例表示为“窗口大小_细分长度”, 例如“3_10”表示为窗口大小为 3、细分长度为 10。

从图 3.15 中可以看出, 基于两种细分的质心法提取目标点坐标的精度差异均优于 0.1 个像素, 可以认为两种方法的目标点提取精度基本一致。但是, 当细分长度为 10 时, 两种方法的精度差异波动较大; 而当细分长度为 100 时, 两种方法的精度差异很小, 且相对稳定, 均优于 0.04 个像素, 甚至更小。由此说明, 当细分长度为 100 时, 两种方法的精度无差异。

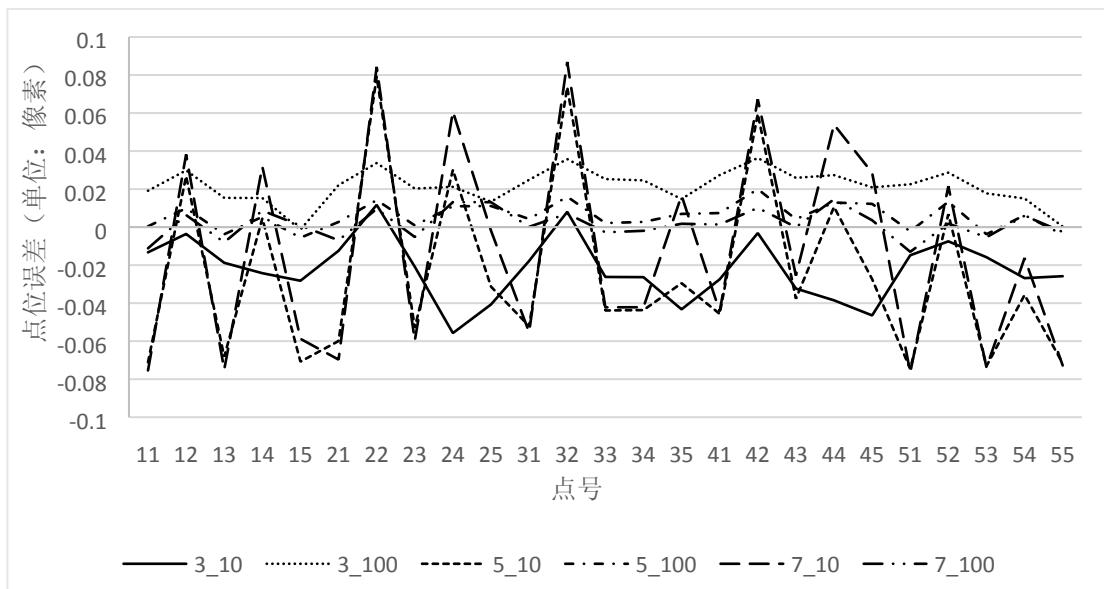


图 3.15 两种细分方法的精度对比
Fig. 3.15 Precision comparison of two kinds of subdivision methods

综上，为了通过质心法获得最优的目标点提取精度，可采用窗口大小为 3、细分长度为 100 的参数设置。此时，在目标点提取精度方面，采用 sinc 函数采样和双线性插值的两种细分方法基本无差异。但是从算法效率上来看，由于 sinc 函数采样细分方法的运算量比较大，相对来说，基于双线性插值细分的质心法提取目标点坐标的效率比较高。由此可见，在目标点提取精度相同的情况下，建议采用基于双线性插值细分的质心法。

3.4.2 基于实测数据的角反射器点提取精度分析

根据地面角反射器点坐标，可以通过 RD 定位模型的间接定位方法，算出地面控制点所在 SAR 影像上的坐标($sample_0, line_0$)；通过本文研究的高精度角反射器点提取方法，同样可以获得该角反射器点的坐标($sample_1, line_1$)；此时可以得到该点的坐标差($\Delta sample, \Delta line$)。对于 SAR 影像内存在 n 个角反射器点时，计算 n 个角反射器点的坐标差($\Delta sample_i, \Delta line_i$)。如果每个角反射器点的坐标差相等，那么 SAR 影像中的误差主要是系统误差，通过少量控制点可以完全消除；如果不相等，说明除了系统误差外，还存在一些随机的残余误差。残余误差主要包括控制点提取误差、SAR 影像畸变误差、轨道位置误差、大气传播延迟改正模型误差、SAR 系统时延随机误差和天线色散误差等。由于每个控制点具有精确的高程信息，对于控制点在 SAR 影像上因地形起伏引起的畸变（如透视收缩、叠掩等）影响可以忽略不计。另外，在一景 SAR 影像内，轨道位置误差、大气传播延迟改正模型误差、SAR 系统时延随机误差和天线色散误差在较短的合成孔径时间内相对

稳定，主要呈现的是固定系统误差，通过控制点的消除会有少量随机误差残留。因此，控制点提取误差是主要的残留误差，也就是说单景几何定标后的结果可以反映出控制点的提取精度。

表 3.3 坐标差值统计

Tab. 3.3 The statistics of coordinate difference

点号	Sample	Line	Plan
103	-0.916349851	-1.092525276	1.425941278
104	-0.954840530	-1.044228048	1.414967369
105	-0.846417580	-0.980620937	1.295391887
106	-1.078056298	-1.074793970	1.522296771
RMSE	0.084081503	0.042586899	0.094251489

基于这个原理，采用嵩山地区一景遥感 13 (YG-13) 号 SAR 影像数据，该影像内布设有四个高精度自动角反射器设备，通过计算两种获取方式的点坐标差值，如表 3.3 所示，残差图如图 3.16 所示。

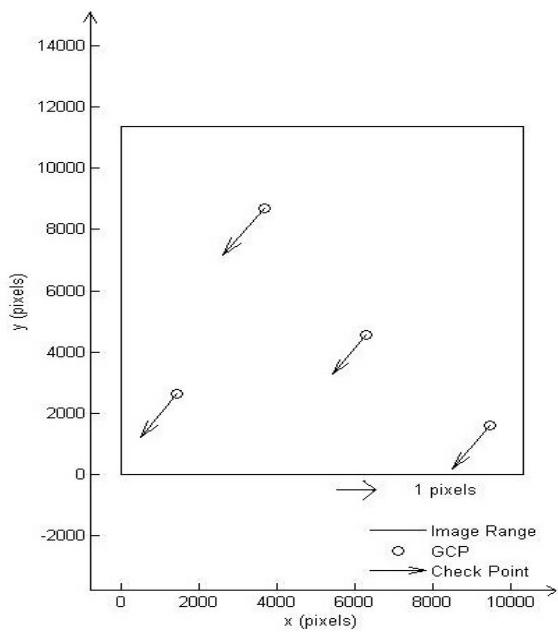


图 3.16 坐标差值残差图

Fig. 3.16 Residual map of coordinate difference

从表 3.3 中可以看出，针对 YG-13 号 SAR 影像，本文研究的高精度角反射器点提取方法精度为 0.094 个像元，即优于 0.1 个像元。

3.5 本章小结

本章首先提出了一种常态化、高精度的自动角反射器设备研制方法，详细介绍了自动角反射器的设计方案；其次，通过对角反射器点的亮度特性分析，研究了高精度提取角反射器点的方法；再次，针对无法拍摄几何定标场区域的星载 SAR 影像，提出了一种基于光学遥感影像的控制点获取方法，有效补充了星载 SAR 影像控制点的获取手段；最后，通过仿真数据和实测数据验证分析了本章所提方法的精度。

4 高精度星载 SAR 几何定标方法

星载 SAR 几何定标方法的核心是，利用控制点在 SAR 影像上的像素坐标与利用严密成像几何模型反算的像素坐标存在偏移量，根据偏移量再反演星载 SAR 系统的几何定标参数，进而实现提升星载 SAR 系统的无控定位精度。

4.1 经典几何定标方法

国外关于 SAR 卫星系统的几何定标方法研究早于国内，但是尚未有详细介绍星载 SAR 几何定标的相关处理方法的报道，可见能为我国开展星载 SAR 几何定标研究提供借鉴的资料甚少。

1996 年，Shimada^[20]最早提出几何定标通过 GCP 定位的直接对比得到。考虑到透视收缩的影响，选择海洋或者海岸线的控制点。采用 3 景 JSAR 影像、50 个 GCP，最后获得的定位精度为 111m^[20]。但是文献未介绍几何定标的具体方法。

2007 年，Bräutigam 等^[28]针对 TerraSAR-X 进行几何定标研究，提出影响几何定位的主要有两个因素：系统的方位向变化和设备内部的电子时延。认为采用角反射器比较合适作为控制点消除以上两个误差，由于其没有额外的电子时延和额外的误差源^[28]。虽然文献提出了星载 SAR 系统的几何定标参数，但是未提出具体的几何定标模型与解算方法，也未见相关的几何定标结果与分析内容。

2009 年，Shimada 等^[114]针对 PALSAR 开展了几何定标研究，考虑了距离向时间和方位向时间两个补偿参数，在 RD 定位模型的基础上构建了几何定标模型，简单分析了目标高程误差的影响，考虑了升轨和降轨数据对几何定标精度的影响^[114]。虽然文献提出了一种星载 SAR 几何定标模型，即，

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{c}{2} \left(\frac{i}{f_s} + \frac{nn}{f_p} + \Delta t \right) \\ f_{dc} = \frac{2f_0}{c} (V_s - V_t) \cdot \frac{(R_t - R_s)}{|R_t - R_s|} \\ x_t^2 + y_t^2 + z_t^2 \frac{R_e^2}{R_p^2} = R_e^2 \end{array} \right. \quad (4.92)$$

式中， nn 为取决于波束数量的整数（即目标点所在的影像行数）。但该几何定标模型仅为距离向时间改正值 Δt 的方程，未体现方式向时间改正值的解算方程，并且也未提及任何关于几何定标参数的解算方法。

综上可知，国际上对于星载 SAR 几何定标主要考虑两个因素：距离向时间误差和方位向时间误差，认为 SAR 卫星的升降轨会对几何定标精度产生影响，而关于几何定标模型与几何定标参数的解算方法等内容，无处得知。

虽然国内关于星载 SAR 几何定标方面的研究相对滞后，但是我国学者经过多年的努力专研，也取得了一些突破性研究成果。

北京大学的周晓等^[118-120]针对 RADARSAT-2 和 TerraSAR-X 数据开展了几何定标研究，在国外学者研究的基础上提出了星载 SAR 几何定标参数有三个：起始斜距（距离向时间）、方位向时间和距离向像素间隔。但是，并未涉及星载 SAR 几何定标模型和解算方法。

武汉大学蒋永华等^[117]在 2011 年提出了星载 SAR 几何定标模型和解算方法，并且提出了四个几何定标参数，即距离向时间、方位向时间、PRF 和采样频率，为我国开展星载 SAR 几何定标相关研究奠定了理论基础。

4.2 顾及大气传播延迟的多模式混合几何定标

从 SAR 系统的工作原理出发，可在 SAR 系统的天线处将雷达信号的延迟影响分为两种，即雷达系统内部的 SAR 系统时延影响和雷达传播路径的大气传播延迟影响，如图 4.1 所示。

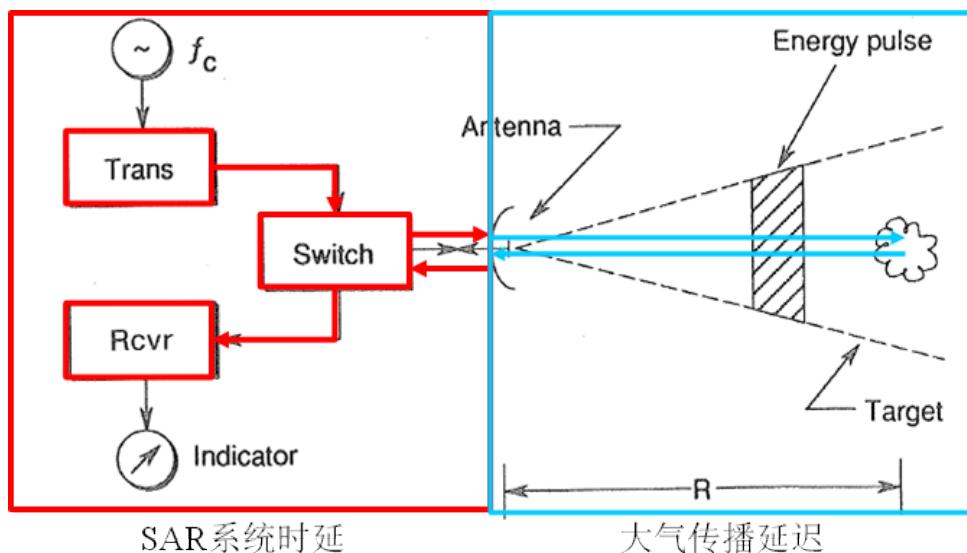


图 4.1 SAR 系统工作原理

Fig. 4.1 The working principle of SAR system

由第二章分析可知, SAR 系统时延是系统误差, 是星载 SAR 几何定标的主要参数; 大气传播延迟是时变误差, 主要受大气环境影响, 可以根据目标点所处的中性大气和电离层环境参数通过大气传播延迟改正模型进行消除。

4.2.1 基于大气传播延迟改正的几何定标模型

雷达信号经过大气层延迟的影响, 而这种影响随着传播路径的增加而变大, 并且雷达信号随大气环境的变化而变化。当 SAR 卫星以不同入射角进行成像, 或者以不同升降轨形式进行, 或者以不同时间对不同地点进行成像, 雷达信号传播路径的改变影响着斜距测量精度, 导致几何定标精度受到严重影响。因此, 大气传播延迟影响星载 SAR 几何定标精度。

SAR 信号的发射和接收都是在时间尺度上完成的, 主要包括快时间(距离向)和慢时间(方位向)。这二维的时间误差主要影响 SAR 影像在距离向和方位向的几何定位误差, 是星载 SAR 几何定位的主要误差源。由此, 构建星载 SAR 几何定标模型:

$$\begin{cases} t_f = (t_{f0} + t_{delay} + \Delta t_f) + \frac{x}{f_s}, & x \in [0, width - 1], y \in [0, height - 1] \\ t_s = (t_{s0} + \Delta t_s) + \frac{y}{f_p} \end{cases} \quad (4.93)$$

式中, t_f 、 t_s 分别为距离向的快时间和方位向的慢时间, t_{f0} 、 t_{s0} 分别为距离向起始时间的测量值和方位向起始时间测量值, t_{delay} 为大气传播延迟时间, Δt_f 、 Δt_s 为系统时延误差, x 、 y 为像素坐标, $width$ 、 $height$ 为 SAR 影像的宽和高。

Δt_f 主要由于雷达信号经过信号通道的各个器件时产生的系统时延。该系统时延可以通过地面实验室标定的形式获得, 但由于卫星发射时雷达载荷器件会发生微小变化, 进而影响雷达信号的系统时延。另外, t_f 还受大气传播延迟影响, 雷达信号穿越大气到达地面再从地面返回大气时的大气路径双向延迟。雷达信号的大气传播延迟影响主要与当地的大气压强、温度、水汽含量、电离层电子密度以及雷达信号的发射频率有关, 因此大气传播延迟误差是与卫星拍摄角度和拍摄时间相关的系统误差。此外, 距离向采样频率 f_s 是由于在信号处理中的距离压缩, 从而引起数据采样时间有一定的延迟, 使得其实际值与系统提供的固定值常有一定的偏差。

Δt_s 主要是由于系统设备时间控制单元的误差引起, 系统设备时间控制单元用于记录所有事件的系统日期, 它有一定的时间精度及一定的记录频率, 它们会对方位向的开始时间精度带来一定影响。针对同一个星载 SAR 系统来说, 该项误差相对比较稳定, 不受成

像模式等因素影响。另外，由于 PRT 对应于每个不同的卫星状态其数值不同，因而存在一定的误差，从而使得脉冲重复频率也有一定程度的误差。另外，由于方位向采样间隔时间的精确性是由发射给脉冲发生器的 A/D 转换器的时序信号的准确度决定的，由于其不稳定性也导致 PRF 有一定程度的误差。

综上，结合星载 SAR 几何定位误差分析，影响星载 SAR 几何定位精度的误差也可以分为固定的系统误差、时变的系统误差和随机误差。（1）固定的系统误差主要指针对同一个星载 SAR 系统，不随成像时间和地点变化的、相对稳定的系统误差。固定的系统误差可以通过几何定标模型进行精确求解，进而提升星载 SAR 系统的无控制点几何定位能力。因此，星载 SAR 系统需要进行几何定标的参数主要有：方位向开始时间改正值 Δt_f 、距离向起始时间改正值 Δt_f 、脉冲重复频率 f_p 和距离向采样频率 f_s 。（2）时变的系统误差主要指随成像时间和地点而变化的系统误差，主要包括大气传播延迟误差和成像处理引入的误差。大气传播延迟误差主要受大气压强、温度、水蒸气含量、电离层电子密度、雷达发射频率和入射角等因素影响，需要通过外部辅助大气数据进行消除。成像处理引入的误差主要是由于星载 SAR 成像的“停走”假设，导致成像时刻与脉冲信号的发射和接收时刻不一致，产生一个的方位向时间误差。星上记录的方位向起始时间 t_{s0} 是雷达信号的接收时刻，然而 SAR 卫星是在持续运动中发射和接收雷达信号，等效的 SAR 成像时刻为雷达信号的发射时刻与接收时刻的中间时刻^[160]，故需进行补偿：

$$t_{s0} = t'_{s0} - \frac{N / f_p + t_{sample_delay}}{2} \quad (4.94)$$

式中， N 为雷达信号从发射到接收经历整周期的个数， t_{sample_delay} 为星上记录的采样时间延迟。（3）随机误差主要指针对同一个星载 SAR 系统而言，无法通过地面处理等手段消除的一些误差，也是影响几何定标精度的主要因素，也可以说是星载 SAR 几何定标后的残余误差。主要包括卫星位置误差、SAR 系统时延随机误差、SAR 天线色散、角反射器布设误差、大气传播延迟模型误差等。然而，针对一景 SAR 影像来说，结合 2.1 节的误差分析，这里的大部分随机误差在较短成像时间内呈现一种系统性，对几何定位精度主要是平移和比例的误差影响。因此，针对一景 SAR 影像的后续应用，可以通过少量地面控制点进一步消除 SAR 影像的系统误差，提升星载 SAR 影像的带控制点几何定位精度。

星载 SAR 几何定标模型与 RD 定位模型的联立。RD 定位模型为星载 SAR 的严密成像几何模型，构建了地面对目标的物方坐标与像方坐标的严密关系，即，

$$\begin{cases} R^2 = (X - X_s)^2 + (Y - Y_s)^2 + (Z - Z_s)^2 \\ f_{dc} = -\frac{2}{\lambda R} (R_s - R_t) \cdot (V_s - V_t) \\ R = \left(t_{f0} + t_{delay} + \frac{x-1}{f_s} \right) \times c \end{cases} \quad (4.95)$$

式中， $R_s = (X_s \ Y_s \ Z_s)^T$ 、 V_s 为 SAR 卫星在 WGS-84 系下的轨道矢量数据， $R_t = (X_t \ Y_t \ Z_t)^T$ 、 V_t 为地面目标点在 WGS-84 系下的位置矢量和速度矢量， c 为光速。星上记录的轨道矢量数据是等时间间隔采集的，实际计算时，SAR 卫星的轨道矢量数据需根据目标点所对应的方位向时间进行多项式拟合插值求出。

通过 RD 定位模型的间接定位算法，可以建立起地面点坐标与方位向时间和星地距离的对应数学关系，而方位向时间和星地距离又是与 SAR 影像方位向行号和距离向列号一一对应的，因而如果影像内有多对控制点，通过最小二乘平差就可以精确计算方位向开始时间改正值和距离向起始时间改正值。

4.2.2 星载 SAR 几何定标参数解算

本文提出的星载 SAR 影像几何定标方法主要是指对距离向和方位向的几何参数的定标算法，即方位向开始时间误差、距离向起始时间延迟误差、PRF、距离向采样频率。通过在 SAR 影像上布置地面角反射器，然后精确获取地面角反射器的影像位置和地面坐标，对 SAR 的方位向、距离向的几何参数进行标定。

星载 SAR 几何定标模型(4.93)可以表示成如下形式^[117]:

$$\begin{cases} F_x = t_f - \left[(t_{f0} + t_{delay} + \Delta t_f) + \frac{x-1}{f_s} \right] = 0 \\ F_y = t_s - \left[(t_{s0} + \Delta t_s) + \frac{y-1}{f_p} \right] = 0 \end{cases} \quad (4.96)$$

式(4.96)的误差方程为，

$$V = Bx - l \quad (4.97)$$

式中，

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial \Delta t_f} & \frac{\partial F_x}{\partial \Delta t_s} & \frac{\partial F_x}{\partial f_s} & \frac{\partial F_x}{\partial f_p} \\ \frac{\partial F_y}{\partial \Delta t_f} & \frac{\partial F_y}{\partial \Delta t_s} & \frac{\partial F_y}{\partial f_s} & \frac{\partial F_y}{\partial f_p} \end{bmatrix}, \quad x = [d\Delta t_f \ d\Delta t_s \ df_s \ df_p]^T, \quad l = \begin{bmatrix} -F_x^0 \\ -F_y^0 \end{bmatrix}.$$

设 $\Delta t_f = 0$ 、 $\Delta t_s = 0$ ， f_s 和 f_p 由星上下传的辅助参数文件获得，采用迭代运算的方法获取几何定标参数 $x = (d\Delta t_f \quad d\Delta t_s \quad df_s \quad df_p)^T$ 。几何定标参数解算的具体步骤如下：

- 1) 利用高精度角反射器点提取算法，可以获得角反射器点在 SAR 影像上的精确位置 (s_i, l_i) ；
- 2) 根据 SAR 影像间接定位算法，通过角反射器的地面坐标和轨道参数，可以计算出该地面角反射器点对应的 SAR 影像方位向时间 t_{si} 和该点的星地距离 R_{st} （即距离向时间 t_{fi} ）。
- 3) 根据公式(4.93)，利用定标场地面布设的 n 个角反射器点，可以组建 n 个方程组。通过基于谱修正法迭代法的最小二乘平差，可精确计算方位向开始时间延迟 Δt_s 、距离向起始时间延迟 Δt_f 、PRF 改正值和采样频率改正值。
- 4) 更新的四个几何定标参数，重新执行步骤 3)，再次计算四个几何定标参数，判断两次计算的几何定标参数之差是否满足收敛条件，若小于预设阈值则迭代终止，否则转向 3) 继续迭代运算。
- 5) 根据计算的四个改正值补偿相应的几何参数，利用不同时刻拍摄的定标场或验证场区域 SAR 数据，验证几何定标后的 SAR 影像几何定位精度。

4.2.3 多模式混合几何定标方法

SAR 系统时延是星载 SAR 系统在同一工作状态下存在的固定偏差，需要分析星载 SAR 系统的工作状态对其的影响，通过确定合理的定标方案进行精确测量。经典几何定标采取考虑升降轨、左右侧视、不同波位等定标方案，但从几何定标参数的物理特性来看，这些条件不是影响几何定标参数的主要影响因素。另外，目前的星载 SAR 系统具有几十个，甚至上百个波位，每个波位逐一标定也是不现实的。

从国内外参考文献可知，不同成像模式（如条带模式、聚束模式、扫描模式等）的几何定位精度不同。然而，不同成像模式本质上的区别是分辨率不同。由于星载 SAR 系统是侧视成像，近距端的分辨率低于远距端的分辨率，为此，在 SAR 卫星设计时，为了实现相同成像模式获取的 SAR 影像产品具备相同的/相近的分辨率，考虑多种误差影响后部分波位应采用不同信号带宽和脉冲宽度的雷达信号进行成像。

从雷达信号特性的角度出发，雷达信号带宽影响 SAR 系统的距离测量精度，带宽越宽，精度越高。因此，雷达信号带宽是 SAR 系统距离精度的基本度量。同时，脉宽会影响测距精度，因为雷达系统以脉冲信号的前沿记为发射时刻，而接收时刻通过对相应的定标通路脉冲压缩，并分析脉压后峰值相对零时刻的时间得到，存在记录系统时延的参考点

不一致导致不同脉宽的系统时延不同, 如图 4.2 所示。也就是说, 信号时宽带宽影响星载 SAR 系统时延误差 Δt_f , 因此需采用不同信号时宽带宽组合方案进行高精度几何定标。

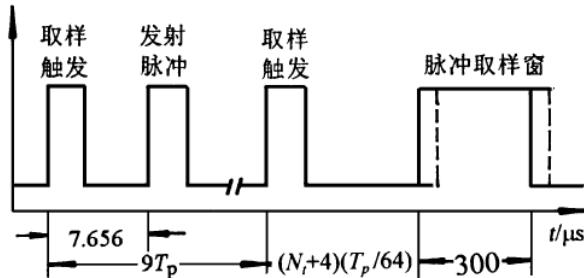


图 4.2 发射脉冲与回波取样之间的相对时延示意图^[41]

Fig. 4.2 Sketch map of relative delay between transmit pulse and echo sampling

顾及大气传播延迟的星载 SAR 多模式混合几何定标方法的主要技术路线, 如图 4.3 所示, 其主要处理流程如下:

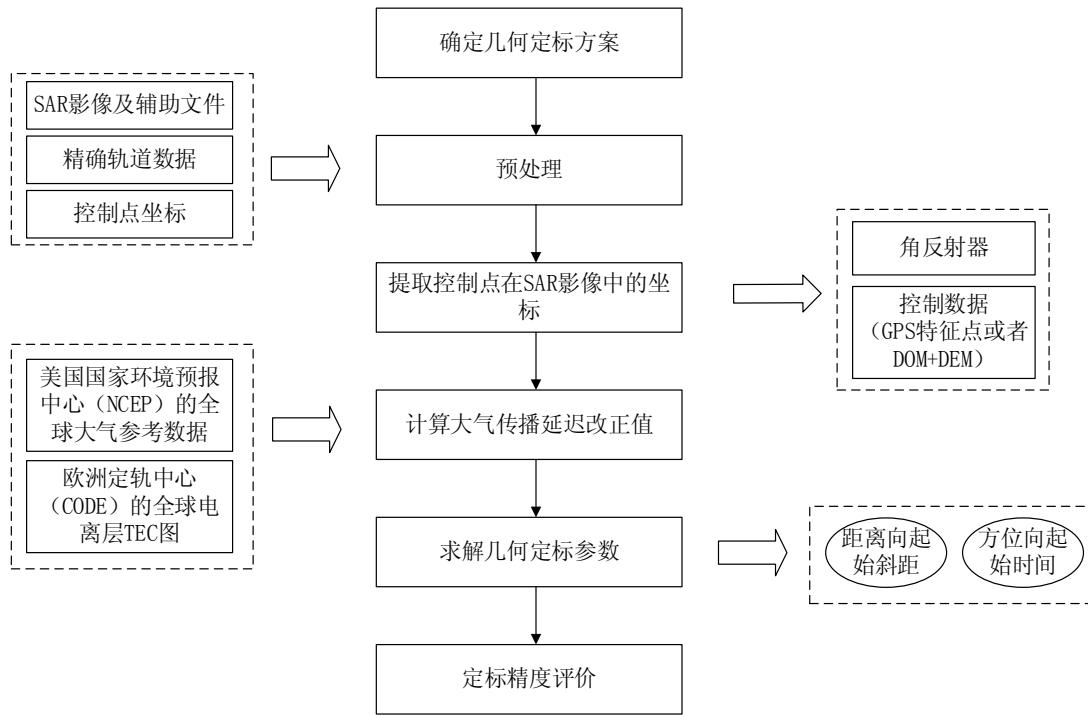


图 4.3 星载 SAR 几何定标技术路线图

Fig. 4.3 Technical routes of geometric calibration for spaceborne SAR

(1) 根据影响星载 SAR 几何定标精度的误差源分析, 确定顾及信号时宽带宽的几何定标方案。然后, 根据 SAR 卫星拍摄任务, 通过远程控制调整自动角反射器姿态对准电磁波的入射方向, 采集满足相应条件的原始 SAR 数据及辅助参数文件, 并通过在 SAR 影像上精确提取角反射器点的中心方式获取控制点的像点坐标。

(2) 根据 NCEP 每六小时更新发布的全球大气参数数据和 CODE 提供的全球 TEC 数据, 计算成像时刻雷达信号从天线相位中心到每个地面控制点的大气传播延迟改正值, 消除雷达信号经过大气的延迟影响。

(3) 利用精确的卫星轨道信息, 通过间接定位算法, 计算 t_f 和 t_s , 并根据控制点在 SAR 影像上的像素坐标与利用严密成像几何模型反算的像素坐标之间的偏移量, 利用式(4.93)和式(4.95)求解几何定标参数 Δt_f 和 Δt_s 。

(4) 利用控制点对几何定标结果进行精度评价。

从顾及大气传播延迟的星载 SAR 的 MMH 几何定标方法流程来看, 主要步骤为模型构建、控制点获取、定标参数解算与精度评价。

4.2.4 星载 SAR 几何定标精度分析

由几何定标模型和 RD 定位模型可知, 影响星载 SAR 几何定标精度的主要因素有卫星星历误差、大气传播延迟模型误差、控制点(角反射器点)测量误差和斜距测量误差。其中, 这里的斜距测量误差主要是 SAR 载荷设计引起的, 包括 SAR 系统时延随机误差、SAR 天线色散等。

(1) 卫星星历误差

卫星星历误差包括卫星位置误差和卫星速度误差。由 2.1.4 节分析可知, 卫星星历误差对 SAR 卫星几何定位精度的影响主要在距离向, 且呈现线性关系, 然而其对不同轨道高度 SAR 卫星的几何定位精度影响略有差异。一般来说, 卫星飞行高度小于 1000 公里, 称为低轨卫星; 卫星飞行高度在 1000 公里到 20000 公里之间, 称为中高轨卫星; 卫星飞行高度大于 20000 公里, 称为高轨卫星。对于低轨卫星, 0.1m 的卫星位置误差引起 0.015m 左右的定位误差, 0.01m 的卫星速度误差引起 2m 左右的定位误差^[161]; 对于 36000m 的高轨卫星, 0.1m 的卫星位置误差引起 0.4m 左右的定位误差, 0.01m 的卫星速度误差引起 2.5km 左右的定位误差。由此可知, 对于低轨 SAR 卫星, 通过高精度事后精密定轨数据处理技术, 卫星轨道误差可达到厘米级、卫星速度误差可达到毫米级(甚至亚毫米), 由此引入的几何定位误差在分米量级, 甚至可达厘米量级; 然而对于高轨 SAR 卫星, 即使通过高精度事后精密定轨数据处理技术, 毫米级的卫星速度误差也会引起几百米的几何定

位误差。因此，卫星星历误差对低轨 SAR 卫星的几何定标精度影响约为分米量级，甚至可达厘米量级，而对高轨 SAR 卫星的几何定标精度影响主要是卫星速度误差，可达几百米量级，甚至几公里量级。

(2) 大气传播延迟模型误差

大气传播延迟模型误差主要包括外部大气数据测量误差和插值误差、大气传播延迟改正模型构建误差。外部大气数据主要根据全球分布的一些观测站数据进行拟合获得的，拟合精度主要受观测站分布情况等影响；外部大气数据非实时观测数据，而是定期更新、发布，并且以一定的格网大小存储，因此在插值使用时，存在时间和空间上的插值误差。另外，为了精确估计大气传播延迟影响，大气传播延迟改正模型主要是依据经验公式和理想模型进行构建。然而，对于复杂多变的大气环境，再精确的大气传播延迟改正模型也会存在一定误差。由于国际上先进的 TerraSAR-X 卫星经过验证可以达到厘米级的几何定位精度^[138, 139]，利用本文采用的大气传播延迟改正模型（下文 2.4 节即将介绍）得到的计算结果与 TerraSAR-X 卫星的辅助文件中提供的大气传播延迟改正值对比，差值均小于 0.2m。由此可以认为，本文采用的大气传播延迟改正模型精度优于 0.2m。

(3) 控制点（角反射器点）测量误差

控制点（角反射器点）测量误差主要包括控制点物方坐标测量误差和像方坐标测量误差。由于人工布设角反射器存在布设精度不高、稳定性差等因素，角反射器物方坐标测量精度通过几何定标场布设的高姿态控制精度、高姿态保持精度和高位置精度的自动角反射器设备进行提升。通过 GNSS 接收机采用差分观测技术，对角反射器顶点进行精确测量，可实现厘米级定位精度。对于角反射器点像方坐标量测误差，可以通过高精度点提取方法进行消除，一般可优于 0.1-0.2 个像素。

(4) 斜距测量误差

这里的斜距测量误差主要是 SAR 载荷设计引起的，包括 SAR 系统时延随机误差、SAR 天线色散等。

SAR 载荷的温度、噪声等因素，均会影响雷达信号的系统时延。虽然 SAR 载荷设计了补偿措施，但由于状态监测器件的灵敏度和测量误差，会导致 SAR 系统时延存在随机误差。通常情况下，依靠卫星载荷设计单位进行 SAR 系统时延随机误差控制，一般可实现 1ns 的误差。

对于目前在轨运行 SAR 卫星普遍采用的相控阵天线体制，存在相控阵天线的带宽、大扫描角和高波束指向精度需求相互矛盾的问题^[162]。当天线以一定的带宽扫描时，相控阵天线方向图的波束指向、波束宽度和形状等性将随射频频率发生改变，并且波束指向

的偏移随射频频率的变大而变大，这种现象称为色散效应，又称“孔径效应”^[163, 164]。通常在天线阵列的各单元或各子阵级别间采用延迟线消除相控阵天线的色散效应，而延迟时间是频率的函数，补偿孔径渡越时间，由此相控阵天线的波束指向不随射频频率发生偏移。但考虑星上资源受限，考虑在全阵面仅作部分时间延迟补偿，以减轻 SAR 天线的重量和器件规模，由此产生残余的色散误差，导致相控阵单元间的延迟时间差存在差异，影响斜距测量精度。同理，对于阵列馈源的反射面天线，若采用延迟线替代移相器，同样会产生 SAR 天线色散，影响斜距测量精度。一般情况下，通过卫星载荷设计单位的优化设计，SAR 天线色散误差引起的斜距误差可优于 0.2m。

4.3 基于同名点约束的交叉几何定标

以上所提的高精度星载 SAR 卫星几何定标方法主要依赖于高精度地面控制数据。通常，获取几何定标所需的高精度地面控制数据的主要方法包括：1) 人工角反射器；2) 自动角反射器；3) 基于高精度航空正射影像、数字高程模型的同名点匹配。然而，三种方法均有不足之处：利用人工角反射器方法，人工野外布设成本较高，布设周期较长，难以满足常态化定标与周期性质量检测；利用自动角反射器方法，虽然工作周期显著提高，但由于场地固定，难以满足多类型、多模式 SAR 卫星的几何定标需求；基于高精度航空正射影像、数字高程模型的同名点匹配方法，虽然可以满足多类型、多模式 SAR 卫星的几何定标需求，但是容易因时相、季节、地表属性变更等问题加大了影像间匹配难度。随着我国对高时间分辨率遥感影像的需求，我们国家将计划发射多颗民用和军用 SAR 卫星，由此常态化定标与周期性质量检测将成为未来重点发展方向。然而，高精度地面控制数据的获取和快速更新将成为常态化定标与周期性质量检测的瓶颈。本文基于 SAR 系统的斜距成像特性，提出了基于同名点约束的交叉几何定标方法，解决星载 SAR 几何定标对高精度地面控制数据的严重依赖。

4.3.1 交叉几何定标机理

由 SAR 卫星误差特性分析可知，对星载 SAR 几何定位精度的影响主要表现为沿距离向和方位向的平移误差，因此星载 SAR 系统的几何定标参数主要就是方位向起始时间和距离向起始斜距。常规几何定标方法都是利用高精度地面控制点对两个几何定标参数进行解算，为了摆脱对地面控制点的依赖，需要利用 SAR 卫星的成像特性实现对几何定标参数求解，也是星载 SAR 交叉几何定标方法的出发点。

式(4.93)可以表示为，

$$\begin{cases} x = [t_f - (t_{f0} + t_{delay} + \Delta t_f)] \times f_s \\ y = [t_s - (t_{s0} + \Delta t_s)] \times f_p \end{cases} \quad (4.98)$$

针对已精确标定的 SAR 卫星来说, 可以认为 $\Delta t_f = 0$ 、 $\Delta t_s = 0$, 那么式(4.98)可以变为,

$$\begin{cases} x = [t_f - (t_{f0} + t_{delay})] \times f_s \\ y = (t_s - t_{s0}) \times f_p \end{cases} \quad (4.99)$$

对于两颗 SAR 卫星, 通过联立式(4.98)和式(4.99), 利用同一地区两幅 SAR 影像的同名点坐标可实现对待定标 SAR 卫星的几何定标参数进行解算。由于星载 SAR 的严密几何成像模型——RD 模型需要已知高程信息才能精确实现几何定位解算, 根据第二章的星载 SAR 几何定位误差分析可知, 若高程存在误差, 将在距离向上存在目标的定位误差(也可称为投影差, 如图 2.2 所示), 但是两幅 SAR 影像的同名点无法通过已精确标定的 SAR 卫星影像获得精确的高程信息。

由式(2.31)可知, 在高程误差相同的情况下, 入射角是影响投影差的主要因素。也就是说, 若两幅 SAR 影像的同名点具有相同的入射角, 那么投影差影响也是相同。由于 SAR 是在斜距平面成像, 即使存在高程误差引起的投影差影响, 但是相同地物目标点在两幅 SAR 影像上仍会成像到相同的位置 P' 上, 如图 4.4 所示。

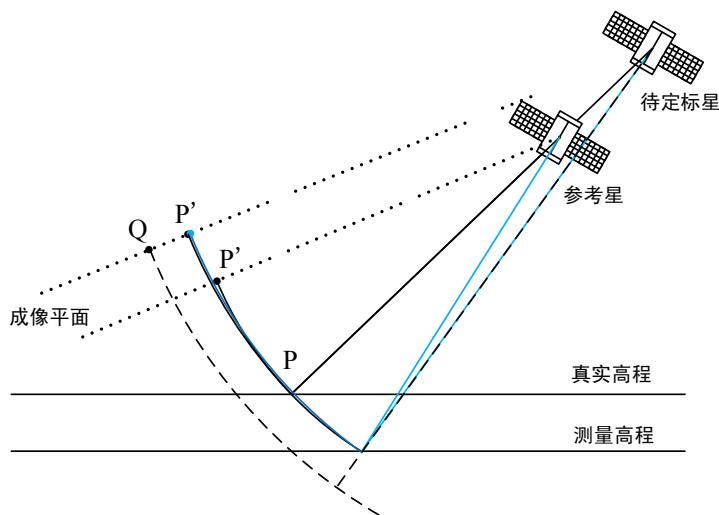


图 4.4 同名点交汇示意图

Fig. 4.4 Schematic diagram of intersection of the same point

当参考星(已精确定标星)和待定标星均不存在斜距误差的情况下, 两颗 SAR 卫星对相同目标点 P 均成像在 P' 点, 高程误差不影响同名点 P' 交汇, 且具有相同的投影差影响。但是, 当待定标 SAR 卫星存在斜距误差时, 目标点 P 在待定标 SAR 影像上将会成像

到 Q 点，那么 QP' 就可以等效待定标 SAR 卫星的斜距误差。由此，实现基于同名点约束的交叉几何定标。

即使两颗卫星以相同视角对同一地区进行成像，由于两颗 SAR 卫星的轨道参数、姿态控制精度等存在差异，导致对相同地物目标点成像的入射角不同。其中，视角与入射角的关系可见图 2.1。根据式(2.31)可知，当两颗 SAR 卫星的入射角不同时，对定标精度的影响可以表示为，

$$\Delta r = |\Delta h / \tan \eta_1 - \Delta h / \tan \eta_2| \quad (4.100)$$

式中， Δr 为因入射角差异引起的交叉几何定标误差， η_1 为参考 SAR 卫星对地物目标点的入射角， η_2 为待定标 SAR 卫星对地物目标点的入射角。当高程误差和入射角差异较小时，误差 Δr 可以忽略不计；当入射角差异较大时，高程误差引起的较大投影差将会严重影响交叉几何定标精度。

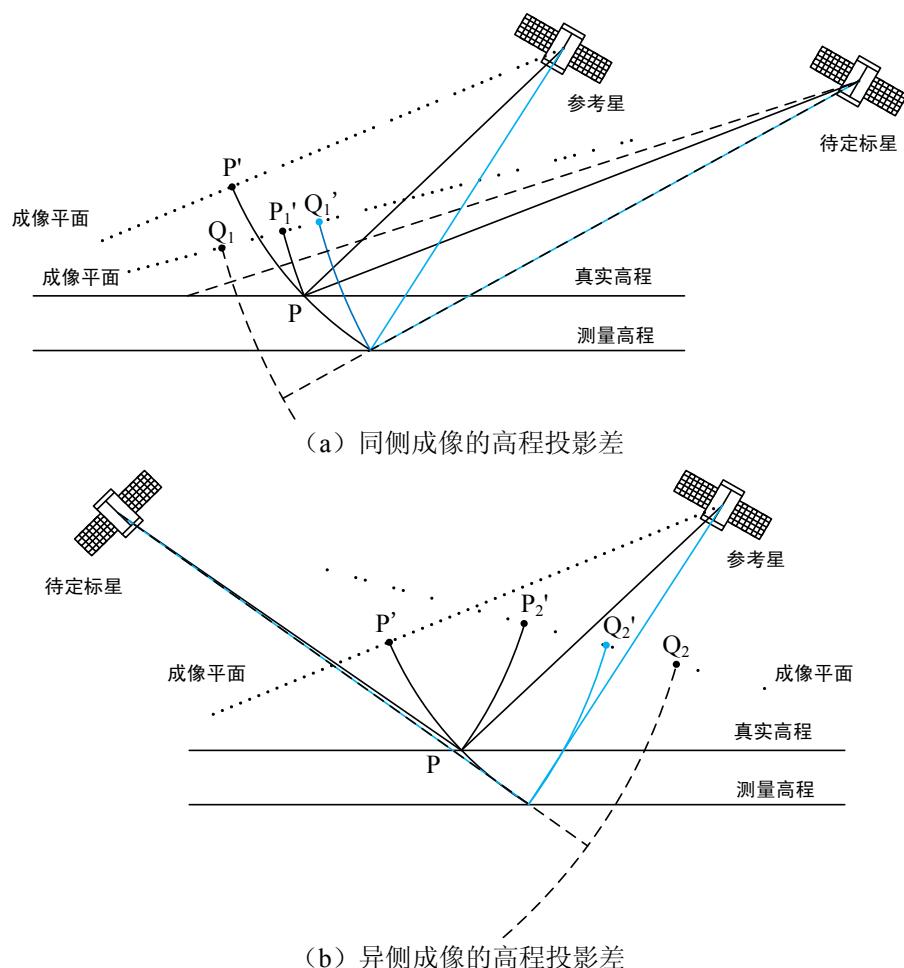


图 4.5 基于同名点约束的自主交叉几何定标原理

Fig. 4.5 Principle of autonomous cross geometric calibration based on the constraint of same point

实际上, 获取两幅相同或相近入射角的 SAR 卫星影像, 时间周期较长, 难以满足 SAR 卫星的常态化定标需求。针对两颗 SAR 卫星入射角不同的情况, 基于高程误差引起目标点投影差的机理, 可采用参考 SAR 卫星两次以异侧、相同入射角的成像方式抵消高程投影差影响, 实现基于同名点约束的自主交叉几何定标方法, 如图 4.5 所示。

在图 4.5 (a) 中, 由于高程误差, 地物目标点 P 定位到 \bar{Q}_1 ; 然而, 又由于斜距误差, 地物目标点 P 定位到 \bar{Q}_1' 。由此, 真实的斜距误差为 $\bar{Q}_1\bar{Q}_1'$, 而实际测量的斜距误差为 $\bar{Q}_1'\bar{P}_1'$, 则有,

$$\bar{Q}_1\bar{Q}_1' = \bar{Q}_1\bar{P}_1' + \bar{P}_1'\bar{Q}_1' \quad (4.101)$$

式中, $\bar{P}_1'\bar{Q}_1'$ 为高程误差引起目标点在 SAR 影像上的投影差。同理, 由图 4.5 (b) 可得,

$$\bar{Q}_2\bar{Q}_2' = \bar{Q}_2\bar{P}_2' - \bar{P}_2'\bar{Q}_2' \quad (4.102)$$

由式(4.101)和式(4.102)构成观测方程:

$$\begin{cases} \bar{Q}_1\bar{P}_1' = \bar{Q}_1\bar{Q}_1' - \bar{P}_1'\bar{Q}_1' \\ \bar{Q}_2\bar{P}_2' = \bar{Q}_2\bar{Q}_2' + \bar{P}_2'\bar{Q}_2' \end{cases} \quad (4.103)$$

假设同一颗 SAR 卫星的系统时延误差在一段时间内相对稳定, 则有 $\bar{Q}_1\bar{Q}_1' = \bar{Q}_2\bar{Q}_2'$ 。若待定标星两次以异侧、相同入射角对目标点 P 成像, 则有 $\bar{P}_1'\bar{Q}_1' = \bar{P}_2'\bar{Q}_2'$, 那么由式(4.103)可得,

$$\bar{Q}_1\bar{Q}_1' = \bar{Q}_2\bar{Q}_2' = (\bar{Q}_1\bar{P}_1' + \bar{Q}_2\bar{P}_2')/2 \quad (4.104)$$

也就是说, 待定标 SAR 卫星的系统时延误差引起的真实斜距误差等于两次以异侧、相同入射角的参考 SAR 卫星影像为基准计算得到的斜距误差和的一半。

若两次成像的入射角存在差异, 也会对交叉几何定标精度产生影响, 同式(4.100)。

4.3.2 交叉几何定标模型与求解

由交叉几何定标机理可知, 该方法的本质就是利用已精确标定的 SAR 卫星影像实现其他 SAR 卫星的几何参数定标。根据式(4.98)和式(4.99), 可构建交叉几何定标模型为,

$$\begin{cases} x_C = [t_{fC} - (t_{f0C} + t_{delayC} + \Delta t_{fC})] \times f_{sc} \\ y_C = [t_{sc} - (t_{s0C} + \Delta t_{sc})] \times f_{pc} \\ x_R = [t_{fR} - (t_{f0R} + t_{delayR})] \times f_{sr} \\ y_R = [t_{sr} - t_{s0R}] \times f_{pr} \end{cases} \quad (4.105)$$

式中, x_C 、 y_C 为目标点在待定标 SAR 卫星影像上的像素坐标, t_{fC} 、 t_{sc} 分别为目标点在待定标 SAR 卫星影像中对应的距离向快时间和方位向慢时间, t_{f0C} 、 t_{s0C} 分别为待定标

SAR 卫星影像的距离向起始时间测量值和方位向起始时间测量值, t_{delayC} 为目标点在待定标 SAR 卫星影像中对应的大气传播延迟时间, Δt_{fC} 、 Δt_{sC} 为待定标 SAR 卫星的系统时延误差, f_{sC} 、 f_{pC} 分别为待定标 SAR 卫星的采样频率和脉冲重复频率; x_R 、 y_R 为目标点在参考 SAR 卫星影像上的像素坐标, t_{fR} 、 t_{sR} 分别为目标点在参考 SAR 卫星影像中对应的距离向快时间和方位向慢时间, t_{f0R} 、 t_{s0R} 分别为参考 SAR 卫星影像的距离向起始时间测量值和方位向起始时间测量值, t_{delayR} 为目标点在参考 SAR 卫星影像中对应的大气传播延迟时间, f_{sR} 、 f_{pR} 分别为参考 SAR 卫星的采样频率和脉冲重复频率。

基于同名点约束的交叉几何定标求解步骤为:

- 1) 根据已精确标定(参考)的 SAR 卫星影像情况, 选取入射角相近的待定标 SAR 卫星影像, 或者针对待定标 SAR 卫星影像的相同区域, 选取参考 SAR 卫星以相同入射角通过异侧成像获得的两幅 SAR 影像;
- 2) 通过 SAR 影像特征点匹配的方式, 选取参考 SAR 卫星影像与待定标 SAR 卫星影像间的同名点;
- 3) 分析每个同名点因入射角差异引起的高程投影差影响, 剔除影响较大的同名点;
- 4) 在参考 SAR 卫星影像上, 根据同名点的像方坐标(x_R, y_R), 利用式(4.105)求解同名点在参考 SAR 卫星影像上的快时间和慢时间(t_{fR}, t_{sR});
- 5) 假定同名点的高程初值 $H_0 = 0$, 根据 RD 定位模型可求得同名点的物方坐标(lat, lon, H_0), 然后根据计算得到的(lat, lon), 利用当地高精度 DEM 或全球 SRTM 为参考内插出高程值 H_{DEM} , 赋值给高程初值 $H_0 = H_{DEM}$, 迭代求解同名点物方坐标, 迭代收敛条件为 $|H_0 - H_{DEM}| < 0.1$, 即计算出同名点的经纬度和高程值(lat, lon, H), 该计算原理如图 4.6 所示;

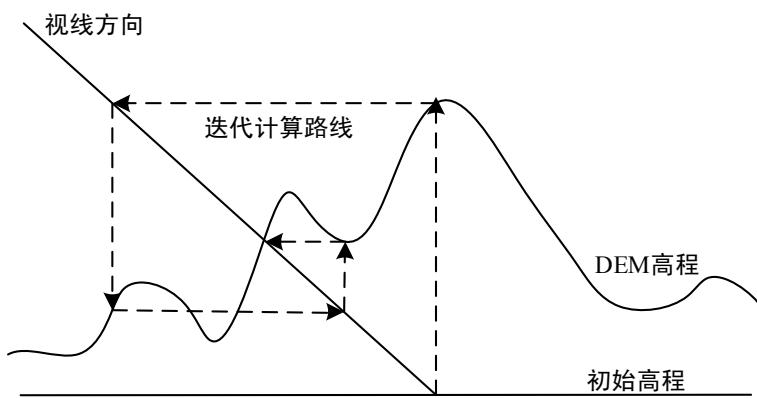


图 4.6 基于 DEM 迭代求解物方坐标示意图

Fig. 4.6 Schematic diagram of iterative solution of object coordinates based on DEM

6) 利用步骤 4) 求得的同名点物方坐标(lat, lon, H)，根据 RD 定位模型计算同名点在待定标 SAR 卫星影像上的快时间和慢时间(t_{fc}, t_{sc})，再根据同名点在待定标 SAR 卫星影像上的像方坐标(x_c, y_c)，利用式(4.105)求解待定标 SAR 卫星的几何定标参数 Δt_{fc} 和 Δt_{sc} ；

7) 若参考 SAR 卫星影像和待定标 SAR 卫星影像为同侧成像且入射角相同，那么步骤 5) 所计算的结果即为待定标 SAR 卫星的几何定标参数；若参考 SAR 卫星影像和待定标 SAR 卫星影像的入射角差异较大，应采用以异侧成像且入射角相同的另一幅已精确定标的 SAR 卫星影像为基准重复步骤 2) ~5)，取两次计算结果的平均值即为待定标 SAR 卫星的几何定标参数。由此，完成交叉几何定标参数解算。

4.4 实验与分析

4.4.1 时宽带宽组合和大气传播延迟对几何定标的影响

为了对比分析本文所提方法与经典方法的差异，采用河南嵩山定标场地区的遥感 13 号数据进行实验分析，具体数据详情可见 5.1 节。数据采集从 2015 年 12 月 28 日到 2016 年 5 月 29 日。本文所提的几何定标方法，主要创新考虑了时宽带宽组合与大气传播延迟对几何定标精度的影响。因此，下面从这两个方面进行对比分析。

(1) 时宽带宽组合对几何定标的影响

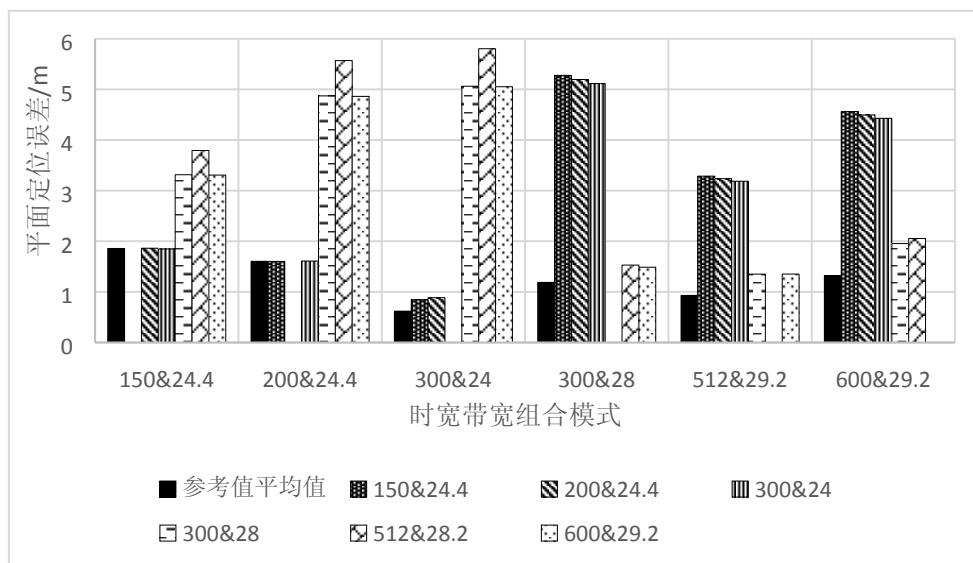


图 4.7 信号时宽带宽组合影响几何定标结果的对比

Fig. 4.7 Comparison results of geometric calibration based on different time-width and bandwidth combinations

每个时宽带宽组合的系统时延存在差异性,为了验证本文提出几何定标方案的必要性,进行不同时宽带宽组合之间相互标定补偿实验。根据其中一个时宽带宽组合的几何定标参数,补偿其余时宽带宽组合 SAR 影像的几何参数,然后评价这种补偿方法的 SAR 影像几何定位精度,结果对比如图 4.7 所示。

图 4.7 中的参考值平均值(黑色实填充的柱体)为利用本文提出的顾及信号时宽带宽的高精度几何定标结果,其余形状填充的柱体表示利用图例所示的时宽带宽组合标定的几何定标参数,补偿坐标系横轴所示的时宽带宽组合的 SAR 影像后的几何定标结果。通过对比图可以看出,不考虑信号时宽带宽组合的情况下, YG-13 号 SAR 影像的几何定标结果均比本文所提方法的几何定标结果差,最大平面定位误差将近 6 米;然而本文所提方法的几何定标结果均优于 2 米。由此说明,本文提出考虑雷达信号时宽带宽组合的几何定标方案是必要的。

(2) 大气传播延迟对几何定标的影响

雷达信号的大气传播延迟影响主要影响星载 SAR 系统的斜距测量精度,也就是影响几何定标参数中的距离向初始斜距改正值。因此,下面从两个方面进行实验分析雷达信号的大气传播延迟对几何定标的影响。

在不考虑大气传播延迟影响的情况下, YG-13 号条带模式两个组合(24.4 us & 200 MHz 和 24.4 us & 150 MHz) 的 22 景嵩山定标场 SAR 影像数据的距离向初始斜距改正值,随时间的变化如图 4.8 所示。利用本文提出的星载 SAR 几何定标方法,在考虑大气传播延迟影响的情况下, YG-13 号条带模式两个组合(24.4 us & 200 MHz 和 24.4 us & 150 MHz) 的 22 景嵩山定标场 SAR 影像数据的距离向初始斜距改正值,随时间变化趋势如图 4.9 所示。

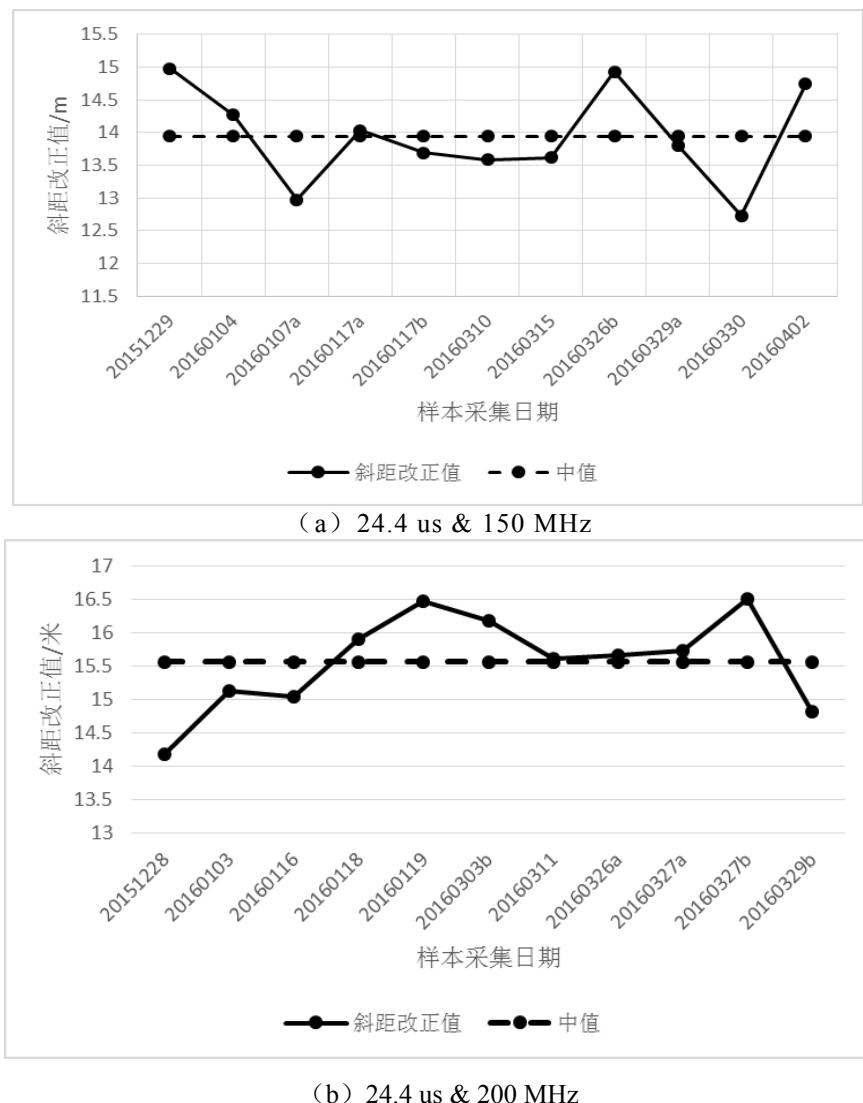


图 4.8 未考虑大气传播延迟影响时距离向斜距改正值变化趋势

Fig. 4.8 Changing trend of time correction value in range without considering the atmospheric propagation delay influence

由图 4.8 和图 4.9 可以看出，在不考虑大气传播延迟影响的情况下，初始斜距改正值的变化范围均超出 2 m，且时宽带宽组合为 150 MHz & 24.4 us 的初始斜距改正值中误差为 0.709 m，时宽带宽组合为 200 MHz & 24.4 us 的初始斜距改正值中误差为 0.688 m；采用本文的方法，在考虑大气传播延迟影响的情况下，初始斜距改正值的变化量均未超过 2 m，初始斜距改正值的中误差分别为 0.6094 m、0.6088 m，相比之下初始斜距改正精度均有所提升，说明几何定标参数的变化趋势相对稳定。由此说明，本文提出顾及大气传播延迟的星载 SAR 几何定标方法是有效性的。

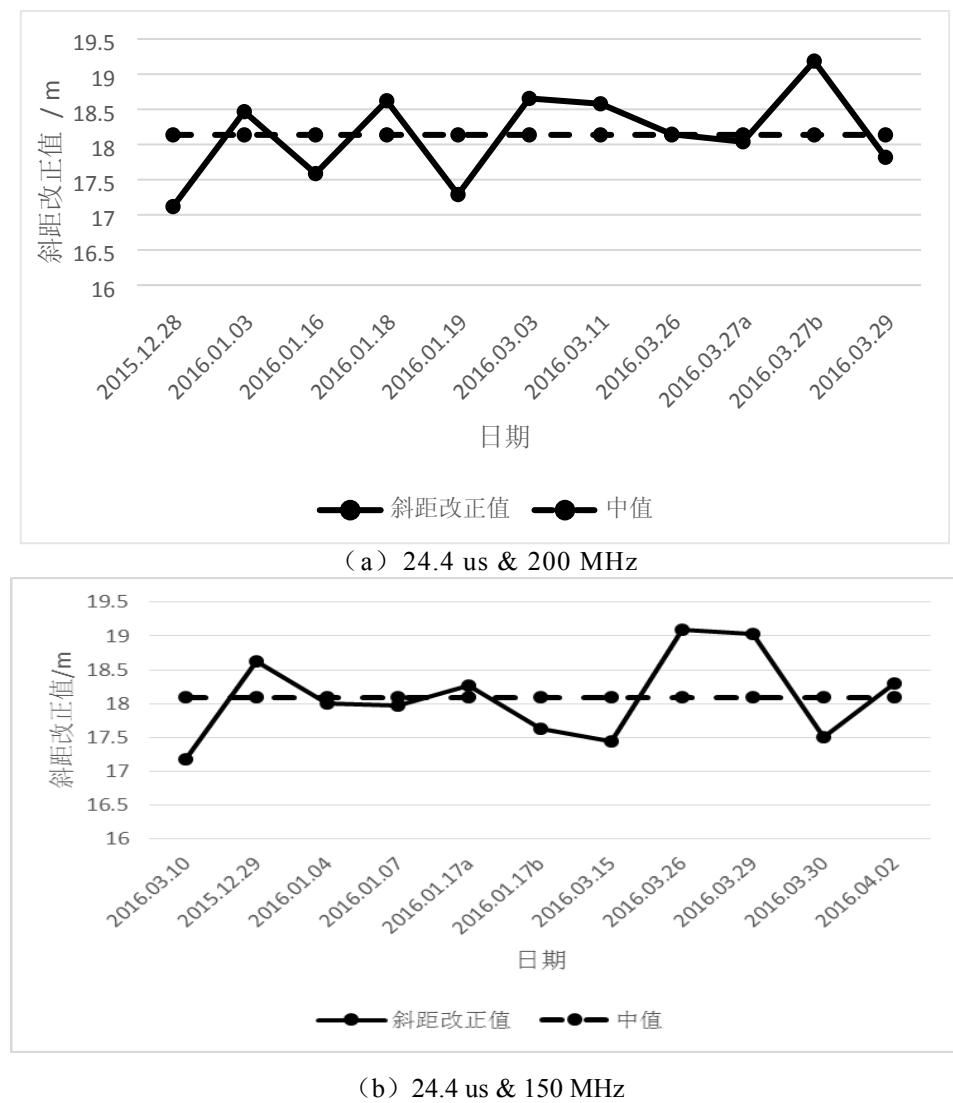


图 4.9 考虑大气传播延迟影响时距离向斜距改正值变化趋势

Fig. 4.9 Changing trend of time correction value in range considering the atmospheric propagation delay influence

4.4.2 入射角差异对交叉几何定标的影响

由理论分析部分可知，当参考 SAR 卫星与待定标 SAR 卫星的入射角相同时，利用同名点约束条件可消除高程误差引起的投影差影响，实现对待定标 SAR 卫星的几何定标参数精确求解；或者，当参考 SAR 卫星与待定标 SAR 卫星的入射角存在较大差异时，参考定标 SAR 卫星两次以相同入射角对同一地区进行异侧成像，根据高程误差引起的投影差具有大小相等、方向相反的特性，采用两次定标结果的均值作为待定标 SAR 卫星的几何定标参数，消除高程误差引起的投影差影响，实现交叉几何定标解算。然而，由于目标点

空间分布、卫星姿态控制误差等因素，同名点的入射角难以严格保证相同，因此入射角差异产生起高程投影差影响，进而影响交叉几何定标精度。

为了分析入射角差异对交叉几何定标的影响，利用中国嵩山遥感卫星定标场的 YG-13 号 SAR 卫星数据（如表 4.1 所示）进行分析。由于该区域的 SAR 卫星影像数据具有星地同步测量的自动角反射器设备，而角反射器点在 SAR 影像上的提取精度高，这在一定程度上可以减小同名点选取误差对实验结果分析的影响。同时，YG-13 号 SAR 卫星已精确定标，这在一定程度上可以减小系统时延误差对实验结果分析的影响。

首先，根据图 2.1 所示的视角与入射角关系，利用卫星轨道、斜距和视角等数据计算 SAR 影像的近距端和远距端入射角。然后，根据同名点所在的列号，插值计算同名点所在列的入射角，并根据式(4.100)，计算理论的入射角差异影响。其次，根据 RD 定位模型，利用同名点的像方坐标和不同误差高程值计算其物方坐标，与真实的大地坐标进行对比，并计算同名点在两景 SAR 影像上定位误差的差值。最后，对比理论差值和计算差值，进而分析入射角的差异影响。考虑篇幅问题，每组影像对选取一个同名点（具有代表性）进行分析，具体的计算结果，如表 4.2 所示。

表 4.1 遥感 13 号数据信息

Tab. 4.1 Data information of YG-13

组合模式	编号	成像日期	视角	升降轨	左右侧视	同名点数量
同侧成像	SS1	20160118	31.36	降轨	右侧视	3
		20160327	31.15	升轨	左侧视	
	SS2	20160119	37.52	升轨	左侧视	2
		20160311	37.07	降轨	右侧视	
异侧成像	OS1	20160119	37.51	升轨	左侧视	1
		20160329	38.01	升轨	右侧视	
	OS2	20160303	22.70	降轨	左侧视	2
		20160326	23.58	降轨	右侧视	

表 4.2 中的差值为理论误差与计算误差的差值，该值主要受 SAR 卫星影像的几何定位精度影响。从表 4.2 的结果可知，在无高程误差的情况下，入射角差异引起的投影差为 0m，计算误差主要为 SAR 卫星影像的几何定位误差，均优于 1.5m；即使在有高程误差的情况下，当减去因入射角差异引起的投影差影响后，差值均优于 3m。由于 YG-13 号卫星

经过几何定标后，在无控制点条件下其几何定位精度优于3m，与此结果基本一致，由此说明该实验分析的合理性。

从表4.2的结果可知，在入射角差异相同的情况下，投影差影响随高程误差的增加而变大；在高程误差相同的情况下，投影差影响随入射角差异的变大而变大。然而，对于不同分辨率的SAR卫星影像来说，几何定标精度对投影差的容忍程度也不同。一般情况下，通过航空手段获得的当地局部区域高精度DEM的高程精度优于5m，当入射角差异为1.683°时，投影差为0.7907m。对于3m左右的高分辨率SAR卫星影像来说，该误差影响可以忽略；而对于0.5m左右的高分辨率SAR影像来说，该误差影响超过了一个像素，因此需要提高对入射角差异的限制条件，例如入射角差小于0.7°。然而，对于30m格网的全球SRTM数据，高程精度在10m左右。若要满足0.5m以上的高分辨率SAR卫星几何定标需求，入射角差异至少应小于0.6°，甚至更高。

表 4.2 入射角差异引起的高程投影差

Tab. 4.2 Height projection difference caused by incidence angle difference

编号	点号	高程 误差 (m)	入射角 差 (°)	理论 误差 (m)	影像1 投影差 (m)	影像2 投影差 (m)	计算 误差 (m)	差值 (m)
SS1	104	0		0.0000	1.2016	1.0515	0.1501	0.1501
		5		0.0603	7.7975	6.3926	1.4049	1.3446
		10		0.1207	14.8661	13.5540	1.3121	1.1914
		20	0.227	0.2413	29.0499	27.9040	1.1459	0.9046
		30		0.3620	43.2443	42.2587	0.9856	0.6236
		40		0.4826	57.4408	56.6139	0.8269	0.3443
		50		0.6032	71.6377	70.9688	0.6688	0.0655
SS2	104	0		0.0000	1.7022	0.4945	1.2077	1.2077
		5		0.1172	4.5383	5.9100	1.3717	1.2545
		10		0.2344	9.9548	11.5100	1.5552	1.3208
		20	0.600	0.4688	20.9402	22.7193	1.7791	1.3103
		30		0.7031	31.9539	33.9304	1.9764	1.2733
		40		0.9375	42.9738	45.1416	2.1678	1.2302
		50		1.1719	53.9958	56.3526	2.3568	1.1849
OS1	102	0		0.0000	1.2964	1.4447	0.1483	0.1483
		5	0.719	0.1384	4.7008	6.8559	2.1551	2.0167

		10	0.2769	10.2137	12.2672	2.0534	1.7766
		20	0.5537	21.3112	23.0894	1.7782	1.2245
		30	0.8306	32.4221	33.9112	1.4891	0.6585
		40	1.1074	43.5357	44.7326	1.1968	0.0893
		50	1.3843	54.6502	55.5536	0.9033	0.4810
		0	0.0000	2.0368	2.0798	0.0430	0.0430
		5	0.7907	10.2427	11.6679	1.4252	0.6345
		10	1.5813	20.9450	21.7014	0.7564	0.8250
OS2	104	20	1.683	42.4873	41.8265	0.6608	2.5019
		30	4.7440	64.0570	61.9646	2.0923	2.6516
		40	6.3253	85.6317	82.1049	3.5267	2.7986
		50	7.9066	107.2071	102.2450	4.9620	2.9446

综上, 因入射角差异导致的投影差, 不同程度地影响着交叉几何定标精度。在实际采用基于同名点约束的交叉几何定标方法对 SAR 卫星的几何定标参数进行求解时, 应根据参考 DEM 的高程精度、SAR 卫星影像分辨率等因素, 综合分析入射角差异引起的投影差影响, 确定可允许的最大入射角之差, 并以此为依据选取 SAR 卫星影像和同名点, 确保交叉几何定标的精度。

4.5 本章小结

本章首先总结了国内外学者研究的经典几何定标方法以及存在的问题; 然后针对国产 SAR 卫星的特点, 从雷达信号特性与几何定位精度之间的关系出发, 提出了一种顾忌大气传播延迟的星载 SAR 卫星多模式混合几何定标方法, 并阐述了该方法实现的具体流程; 基于 SAR 系统的斜距成像特性, 提出了一种基于同名点约束的交叉几何定标方法, 解决星载 SAR 几何定标对高精度地面控制数据的严重依赖; 最后, 结合遥感 13 号影像数据, 对比分析了本文顾及大气传播延迟的星载 SAR 多模式混合几何定标方法与经典几何定标方法的差异, 分析了入射角差异对交叉几何定标的影响, 验证了本文所提方法的有效性。

5 星载 SAR 几何定标方法在国产 SAR 卫星中的应用

5.1 国产 SAR 卫星实验数据

5.1.1 星载 SAR 影像数据

(1) 遥感 13 (YG-13) 号卫星数据

采集的 YG-13 号 SAR 影像数据详细信息, 如表 5.1 所示。

表 5.1 遥感 13 号数据信息统计表

Tab. 5.1 Data information statistics of YG-13

成像模式	时宽带宽	成像日期	成像区域	影像数量
条带模式	24.4 us & 200 MHz	20151228 至 20160329	河南嵩山	11
		20160528	山西太原	1
		20160529	天津	1
	24.4 us & 150 MHz	20151229 至 20160402	河南嵩山	11
		20160601	山西太原	1
		20160609	河北安平	1
滑动聚束模式	29.2 us & 600 MHz	20160610	天津	1
		20160612	湖北咸宁	1
		20151218 至 20160110	河南嵩山	3
	29.2 us & 512 MHz	20160521	湖北咸宁	1
		20160522	天津	1
		20151211 至 20160111	河南嵩山	4
	24 us & 300 MHz	20160527	湖北咸宁	1
		20160604	天津	1
		20160227 至 20160409	河南嵩山	2
	28 us & 300 MHz	20160528	天津	1
		20160604	山西太原	1
		20160314 至 20160324	河南嵩山	2
	28 us & 300 MHz	20160529	山西太原	1
		20160530	河北安平	1

采用 33 景河南嵩山定标场地区和 14 景精度验证场地区（山西太原、河北安平、湖北咸宁、天津）的 YG-13 号数据分别进行几何定标和精度验证。其中，条带模式数据 28 景，用于几何定标的嵩山定标场影像 22 景、用于精度验证的验证场影像 6 景；滑动聚束模式数据 19 景，用于几何定标的嵩山定标场影像 11 景、用于精度验证的验证场影像 8 景。数据采集从 2015 年 12 月 28 日到 2016 年 5 月 29 日。

（2）高分 3（GF-3）号卫星数据

实验数据采用 5 米分辨率（精细条带 1, FSM_I）和 8 米分辨率（全极化条带 1, FPSM_I）的高分三号 SAR 卫星影像数据，采集时间为 2017 年 1 月 11 日至 2017 年 6 月 10 日。为了验证本文对高分三号 SAR 卫星几何定位精度提升的有效性，采用河北省安平县、内蒙古托克托县、河南省登封市、湖北省咸宁市的高分三号 SAR 影像数据和地面控制点数据进行精度验证和评价。GF-3 号实验区分布图如图 5.1 所示，GF-3 号 SAR 影像数据信息如表 5.2 所示。

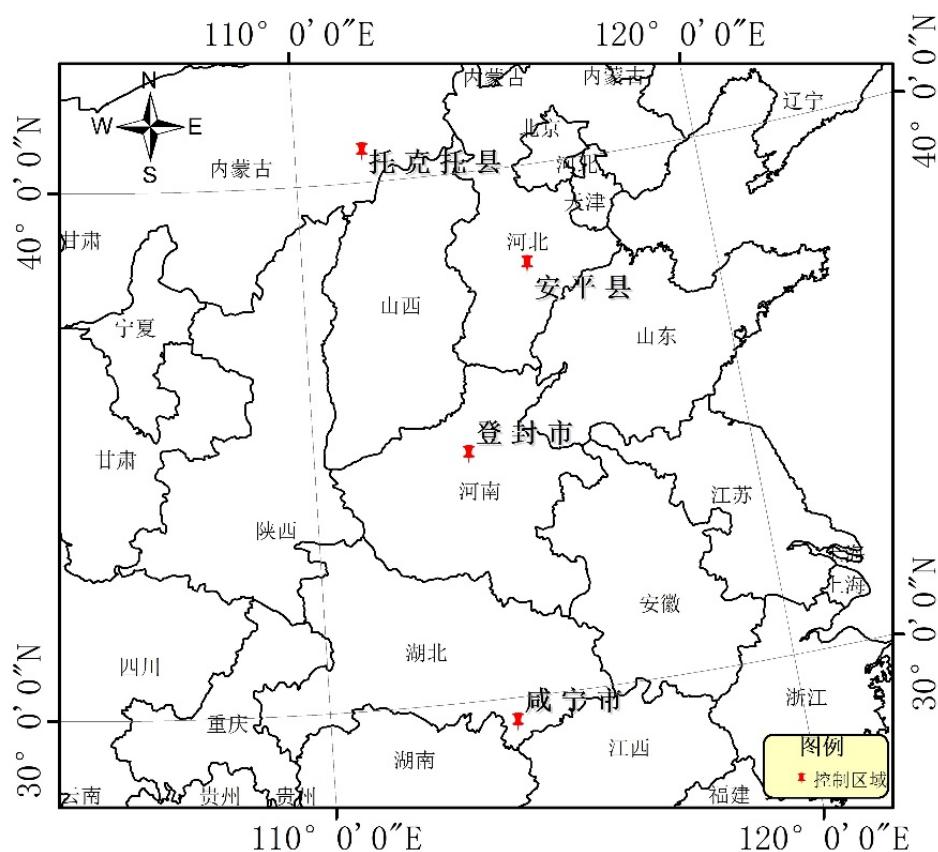


图 5.1 GF-3 号实验区域 SAR 影像数据分布图

Fig. 5.1 GF-3 SAR data coverage in the study site

表 5.2 实验区 GF-3 号卫星影像信息

Tab. 5.2 Data of GF-3 SAR images over the study site

成像模式	时宽和带宽	成像时间	成像区域	影像数量	影像 ID	GCP 数量
FSM_I (5 m 分辨率)	24.99 μs and 50 MHz	2017-1-11	古托克托县	2	NM-0111-1 NM-0111-2	8 2
		2017-1-11	登封市	1	DF-0111	3
		2017-1-11	咸宁市	2	XN-0111-1 XN-0111-2	14 7
		2017-1-23	古托克托县	1	NM-0123	5
	30 μs and 50 MHz	2017-1-23	咸宁市	2	XN-0123-1 XN-0123-2	2 11
		2017-3-6	安平县	1	AP-0306	2
		2017-3-10	咸宁市	1	XN-0310	3
		2017-3-6	咸宁市	3	XN-0306-1 XN-0306-2 XN-0306-3	5 8 6
FPSM_I (8 m 分辨率)	24.99 μs and 30 MHz	2017-2-20	古托克托县	2	NM-0220-1 NM-0220-2	4 2
		2017-4-1	古托克托县	1	NM-0401	3
		2017-5-1	古托克托县	3	NM-0524-1 NM-0524-2 NM-0524-3	3 11 3
	24.99 μs and 40 MHz	2017-6-10	古托克托县	2	NM-0610-1 NM-0610-2	5 6
		2017-4-1	登封市	1	DF-0401	2
		2017-4-1	咸宁市	2	XN-0401-1 XN-0401-2	7 4
	24.99 μs and 50 MHz	2017-4-30	咸宁市	2	XN-0430-1 XN-0430-2	1 1
		2017-5-29	咸宁市	1	XN-0529	1

(3) 遥感 7 (YG-7) 号卫星数据

实验区域位于相邻的中国陕西省西安市阎良区和渭南市蒲城区，属平原地带，海拔高度在 351m~512m 左右。实验采用 6 景 YG-7 号 SAR 影像数据，为右侧视、条带模式成像，分辨率为 3m，影像信息如表 5.3 所示，分布图如图 5.2 所示。

表 5.3 实验区 6 景 YG-7 号卫星影像信息

Tab. 5.3 Data of the six YG-7 SAR images over the study site

影像号	成像时间	轨道	影像大小	中心视角	成像区域
9113_001_004	2013-11-10	降轨	7922/16705	26.50°	阎良区
3624_018_006	2013-12-21	降轨	10992/15245	39.20°	阎良区
6335_010_003	2014-07-10	降轨	7415/15806	24.79°	阎良区
7029_001_017	2014-07-16	降轨	8802/18505	29.79°	阎良区
4275_001_009	2013-12-28	升轨	7111/15962	23.91°	阎良区
7233_001_013	2014-07-17	升轨	11741/15766	44.33°	蒲城区

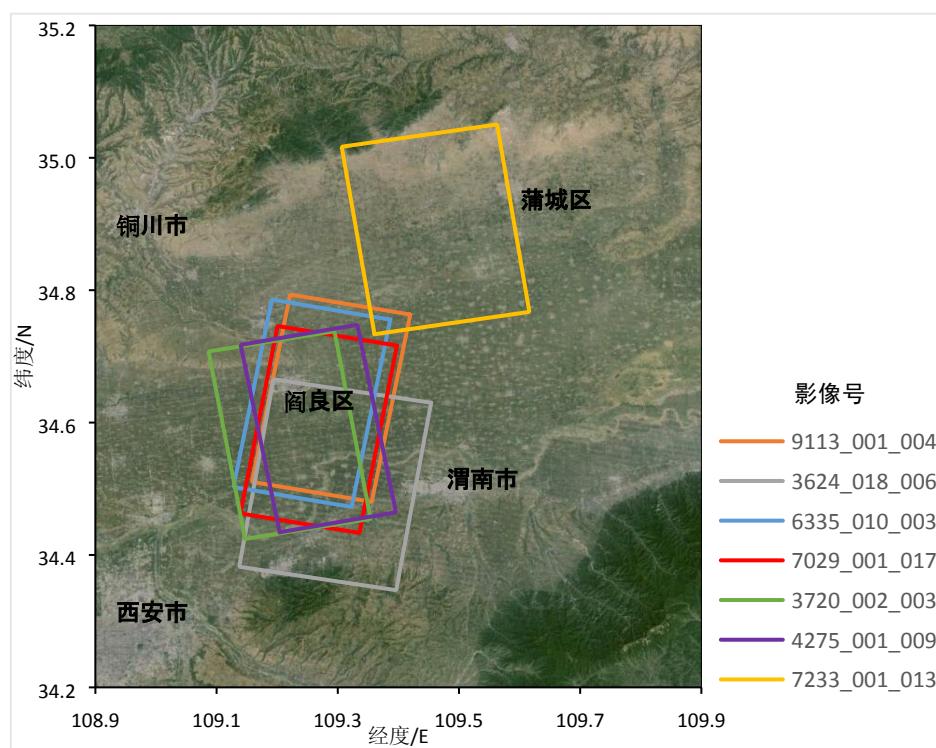


图 5.2 YG-7 号实验区域 SAR 影像数据分布图

Fig. 5.2 YG-7 SAR data coverage in the study site

其中，红色边框的影像（7029_001_017）和黄色边框的影像（7233_001_013）具有角反射器点信息，用于评价 YG-7 卫星影像的正射纠正精度；其余两两影像构成立体像对，用于评价 YG-7 号卫星影像的立体 SAR 测量精度。

表 5.4 YG-7 号立体像对基本参数

Tab. 5.4 Basic Parameters of YG-7 Stereo-pair

配对模式	立体像对编号	影像号	交会角 (°)	重叠度 (%)
同侧成像模式	SS1	6335_010_003		78%
		7029_001_017	5.7°	78%
	SS2	3624_018_006		52%
		7029_001_017	10.9°	68%
	SS3	3624_018_006		41%
		9113_001_004	14.5°	54%
	SS4	6335_010_003		50%
		3624_018_006	16.6°	38%
异侧成像模式	OS1	4275_001_009		85%
		7029_001_017	61.8°	83%
	OS2	4275_001_009		70%
		3624_018_006	71.6°	52%

从式(2.80)中可以看出，为了减小高程误差 E_h ，需增加交会角 $\Delta\theta$ 。也就是说，为了获取较好的立体测图精度，应该增大交会角，这样可以提供较好的观测视差。然而 SAR 的入射角将影响影像间的辐射强度不一致，进而影响立体观测和匹配的效果。较大的几何和辐射差异制约着立体观测和精确的立体测量，需要综合考虑两种因素的影响。为此，本文采用同侧和异侧两种构像方式，选用 6 组不同交会角的 YG-7 立体像对进行实验。6 组立体像对的基本参数如表 5.4 所示。

5.1.2 控制点数据

据 YG-13 号条带模式和滑动聚束模式的成像幅宽和升降轨情况，在河南省登封市嵩山遥感卫星定标场布设了 6 套高精度自动角反射器设备，分布图如图 5.3 所示。每个角反射器点均采用河南省多基站网络 RTK 技术建立的连续运行(卫星定位服务)参考站(CORS)

进行精密测量，实现厘米级点位测量精度。根据 YG-13 号卫星的拍摄计划，远程控制调整自动角反射器设备，实现高效的、快速的星地同步，满足常态化快速定标需求。

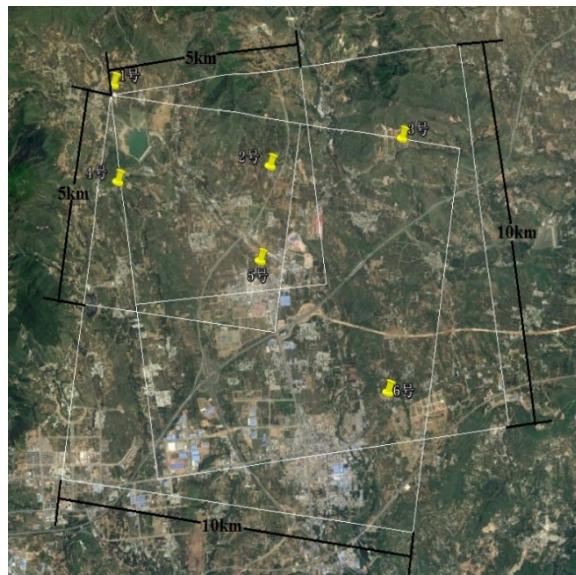
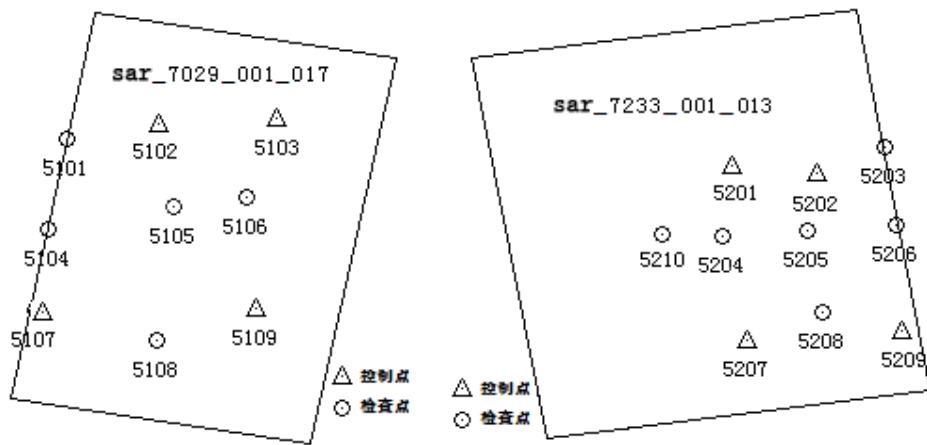


图 5.3 嵩山地区自动角反射器分布图

Fig. 5.3 Distribution of automatic corner reflectors in Songshan area

河北省安平县、内蒙古托克托县、河南省登封市、湖北省咸宁市的地面控制点的选取本着地势平坦、特征明显的原则，主要以“十”字道路中心交叉口、池塘角点等为主。采用多台 GNSS 接收机静态观测或实时动态定位（Real-time kinematic, RTK）技术获取厘米级定位精度的地面控制点数据。



(a) 阎良地区的 YG-7 号影像

(b) 蒲城地区的 YG-7 号影像

图 5.4 影像与控制点的分布图

Fig. 5.4 Distribution of images and control points

另外，在陕西省阎良地区和蒲城地区利用双频 GPS 接收机总共采集了 37 个野外 GPS 测量控制点，精度在厘米级左右。其中，角反射器点 19 个，光学控制点 18 个。影像数据和控制点分布如图 5.4 所示，(a)为阎良地区 SAR 影像(SAR_7029_001_017)覆盖范围，(b)为蒲城地区 SAR 影像(SAR_7233_001_013)覆盖范围。

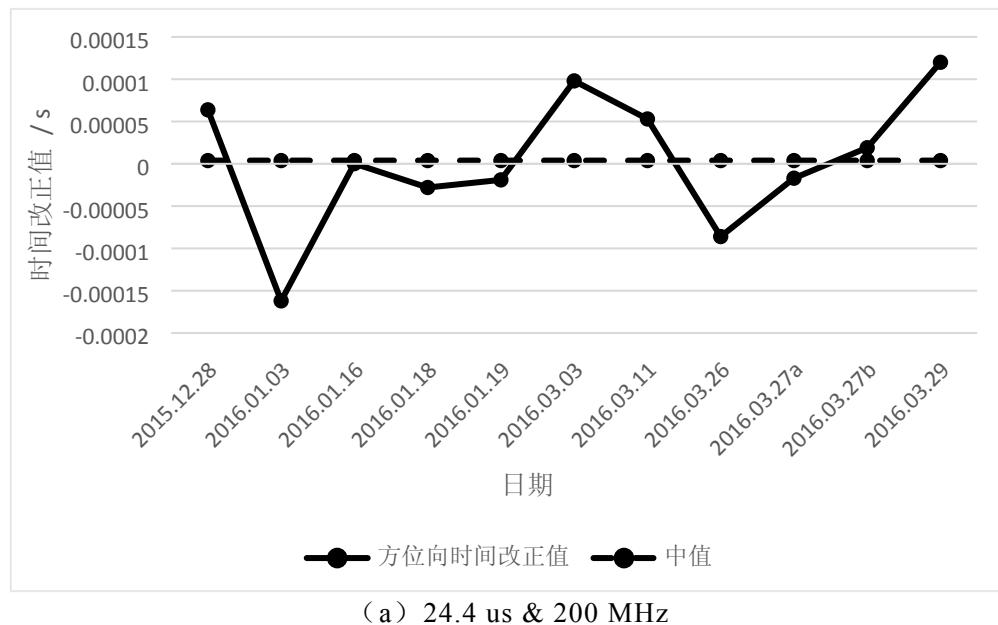
由于 YG-7 号 SAR 卫星的固定波位限制，位于边缘的角反射器点（点号为 5101、5104、5203）未成像到 SAR 影像范围内。

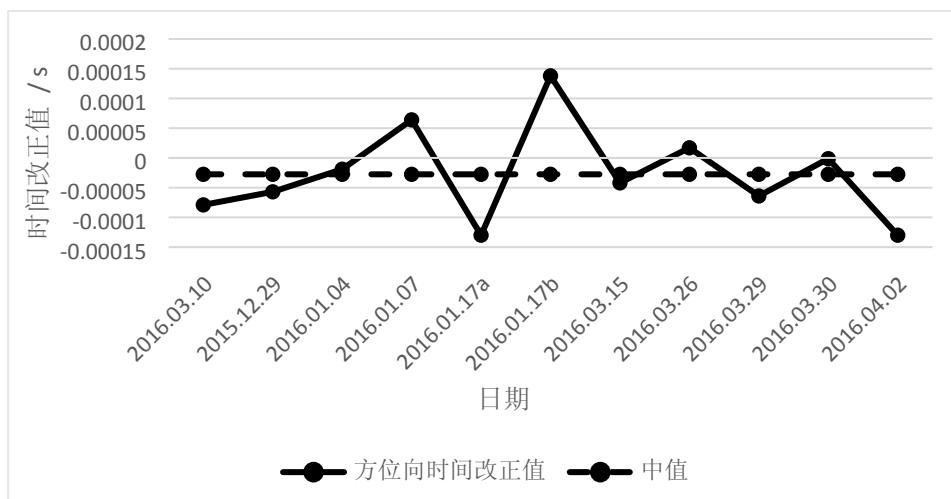
5.2 YG-13 号几何定标与精度验证

利用 YG-13 号数据，进行以下四项实验。（1）采用本文提出的顾及信号时宽带宽的高精度几何定标方法，对 YG-13 号 SAR 卫星数据进行几何定标，并验证定标后的几何定位精度。（2）根据基于不同数量控制点的 YG-13 号 SAR 卫星数据的几何定标结果，分析控制点数据对几何定标精度的影响。

5.2.1 几何定标精度分析与精度验证

基于嵩山定标场的样本数据，首先对方位向起始时间和距离向起始斜距进行几何定标参数解算。然后，根据多次标定后的定标结果（即方位向起始时间、距离向起始斜距）和待验证影像的大气延迟改正信息，补偿验证景影像的几何参数后，再对验证景影像进行重新成像。最后，对验证景数据进行几何定位精度评价。

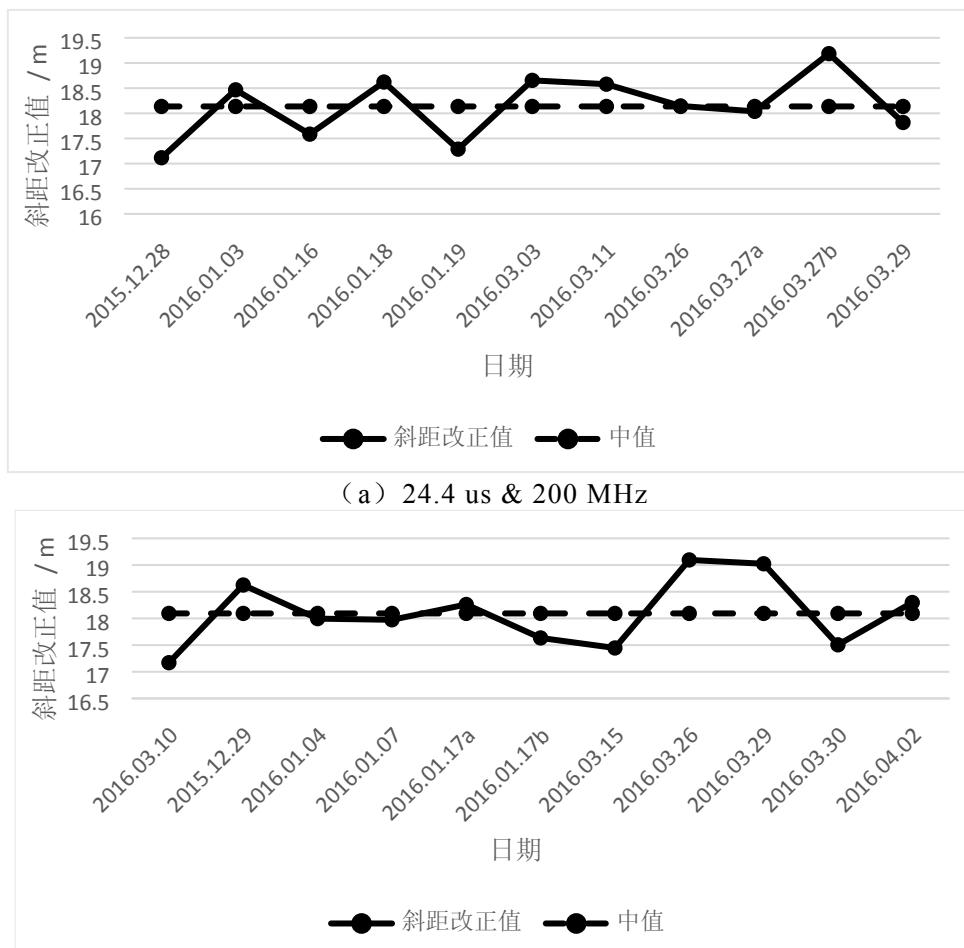




(b) 24.4 us & 150 MHz

图 5.5 方位向时间改正值变化趋势

Fig. 5.5 Changing trend of time correction value in azimuth



(b) 24.4 us & 150 MHz

图 5.6 距离向斜距改正值变化趋势

Fig. 5.6 Changing trend of time correction value in range

表 5.5 几何定标参数补偿前后的几何定位精度对比

Tab. 5.5 Comparison of geometric positioning accuracy before and after compensating for geometric calibration parameters

时宽带宽组合	成像时间和区域	几何定位精度	方位向 (pixel)	距离向 (pixel)	平面	
					(pixel)	(m)
200&24.4	20160528 山西太原	定标前 定标后	2.483 2.482	24.871 0.513	24.995 2.534	15.085 2.329
	20160529 天津	定标前 定标后	0.528 0.528	24.733 0.714	24.739 0.888	14.837 0.878
	20160601 山西太原	定标前 定标后	2.883 2.882	14.729 1.428	15.009 3.217	12.873 2.932
	20160609 河北安平	定标前 定标后	1.609 1.609	15.561 0.347	15.644 1.646	13.421 1.615
150&24.4	20160610 天津	定标前 定标后	1.330 1.330	16.979 0.883	17.031 1.596	14.594 1.536
	20160612 湖北咸宁	定标前 定标后	0.703 0.704	17.052 1.100	17.066 1.306	14.620 1.347
	20160521 湖北咸宁	定标前 定标后	4.018 4.021	78.510 5.246	78.613 6.610	16.828 1.346
	20160522 天津	定标前 定标后	4.685 4.685	82.899 4.545	83.032 6.528	17.772 1.301
600&29.2	20160527 湖北咸宁	定标前 定标后	1.365 1.365	55.105 3.718	55.122 3.961	13.769 0.971
	20160604 天津	定标前 定标后	3.717 3.716	59.625 1.486	59.741 4.002	14.916 0.890
	20160529 山西太原	定标前 定标后	2.143 2.133	43.396 1.812	43.449 2.799	18.599 1.056
	20160530 河北安平	定标前 定标后	1.100 1.100	39.698 1.533	39.714 1.887	17.006 1.319
300&28	20160528 天津	定标前 定标后	0.357 0.342	33.836 1.471	33.838 1.510	14.491 0.640
	20160604 山西太原	定标前 定标后	1.659 1.661	34.427 0.332	34.467 1.694	14.755 0.598

利用本文提出的星载 SAR 几何定标方法, YG-13 号条带模式两个组合 (24.4 us & 200 MHz 和 24.4 us & 150 MHz) 的 22 景嵩山定标场 SAR 影像数据的几何定标参数, 随时间变化趋势如图 5.5 和图 5.6 所示。

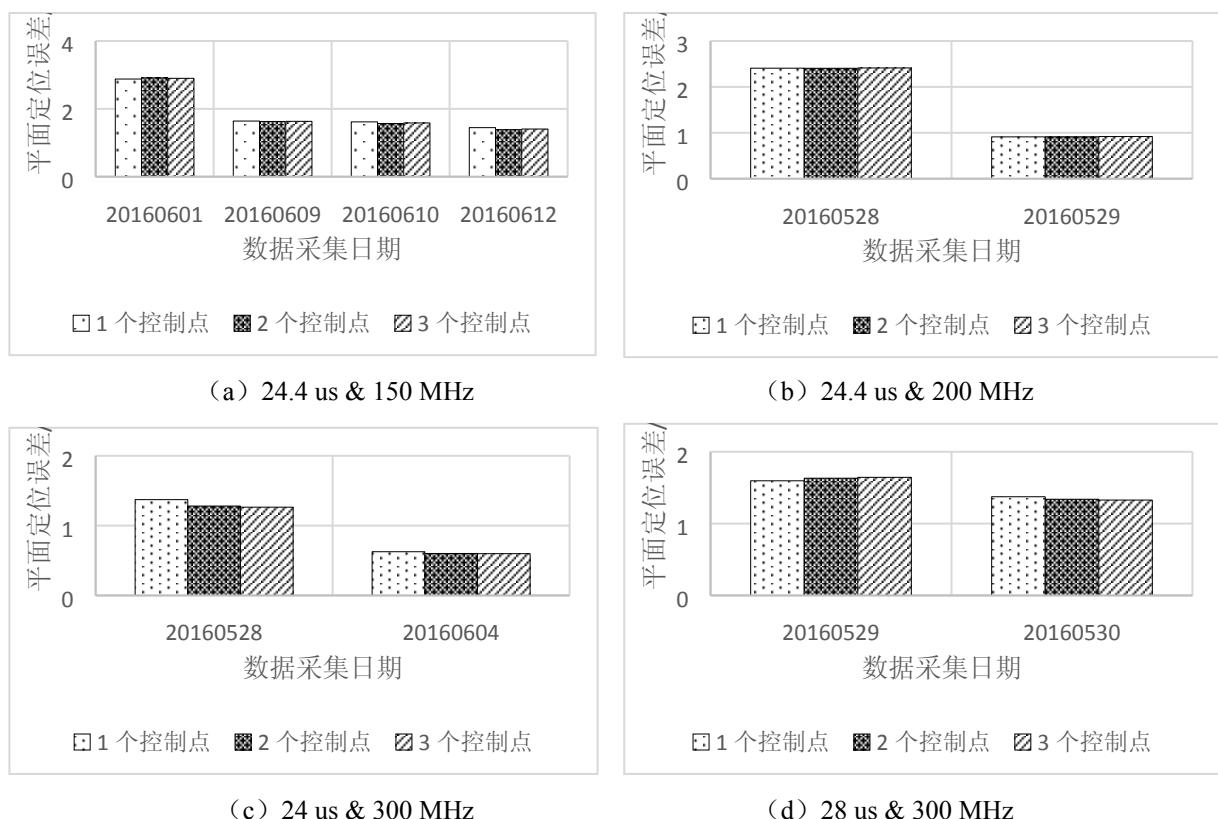
从图 5.5 和图 5.6 可以看出, 方位向时间改正值的变化量不超过 1 ms, 初始斜距改正值的变化量不超过 2 m, 初始斜距改正值的中误差分别为 0.6094 m、0.6088 m, 说明几何定标参数的变化趋势稳定。

根据每个时宽带宽组合模式标定的几何定标参数, 重新成像处理, 补偿验证景的几何参数, 评价标定后的几何定位精度, 结果如表 5.5 所示。

从表 5.5 可以看出, YG-13 号 SAR 影像经过几何定标参数补偿后, 条带模式的几何定位精度优于 3 m, 滑动聚束模式的几何定位精度优于 1.5 m。

5.2.2 控制点数量对几何定标精度的影响分析

地面控制点是星载 SAR 几何定标的关键因素。为了分析控制点数量对星载 SAR 几何定标精度的影响, 分别采用不同个数的控制点进行几何定标实验, 定标前后的几何定位精度对比结果如图 5.7 所示。



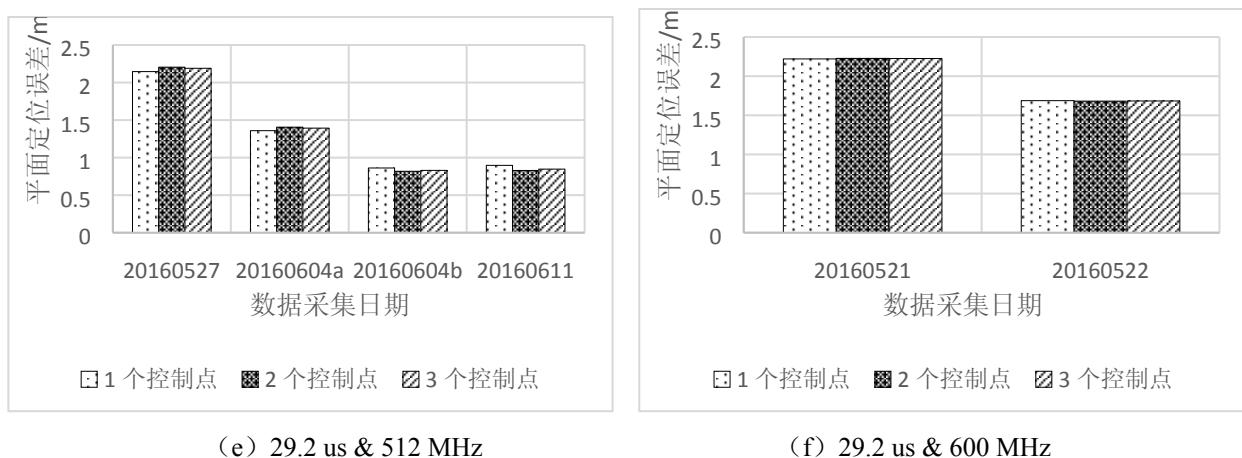


图 5.7 不同控制点个数的几何定标精度对比

Fig. 5.7 Accuracy comparison of geometric calibration based on different numbers of control points

由图 5.7 可知,采用不同个数的地面控制点分别对 YG-13 号 SAR 卫星进行几何定标,标定后其几何定位精度的差值均在厘米量级范围内,说明控制点个数对星载 SAR 几何定标精度基本没有影响,也就是说采用 1 个高精度地面控制点即可实现高精度的星载 SAR 几何定标。

5.3 GF-3 号几何定标与精度验证

针对 GF-3 号卫星的 2 种成像模式 (精细条带 1 和全极化条带 1)、4 个时宽带宽组合 (24.99 us & 50 MHz、24.99 us & 50 MHz、24.99 us & 50 MHz、24.99 us & 40 MHz), 利用四个地面控制区域 (河北省安平县、内蒙古托克托县、河南省登封市、湖北省咸宁市) 进行了几何定标与精度验证实验。其中, 河南省登封市地区采用自动角反射器作为地面控制点, 内蒙古托克托县、河南省登封市、湖北省咸宁市地区采用 GPS 外业测量的地面特征点作为控制点。

5.3.1 大气传播延迟影响分析

根据 NCEP 和 CODE 的外部辅助数据, 对 GF-3 号影像内的控制点逐一计算大气传播延迟改正值。改正值的平均值和最大差值统计结果如图 5.8 所示。

在图 5.8 中, 改正值的最大差值是一景 GF-3 号影像内所有控制点的大气传播延迟改正值的最大值与最小值之差。最大差值的最大值是 0.446m, 表明具有不同成像时间和地区的大气传播延迟改正值也是不同的。由此可见, 通过逐个控制点进行大气传播延迟改正, 几何定位精度可以提升近 0.5m。在图 5.8 中, 改正值的平均值是一景 GF-3 号影像内所有

控制点的大气传播延迟改正值的平均值。平均值的最大差值是 1.184m，表明具有不同空间分布的控制点的大气传播延迟改正值是不同的。由此可见，通过逐个 SAR 影像进行大气传播延迟改正，几何定位精度可以提升约 1m。总之，通过逐个 SAR 影像、逐个控制点进行大气传播延迟改正，可以提升几何定位精度。

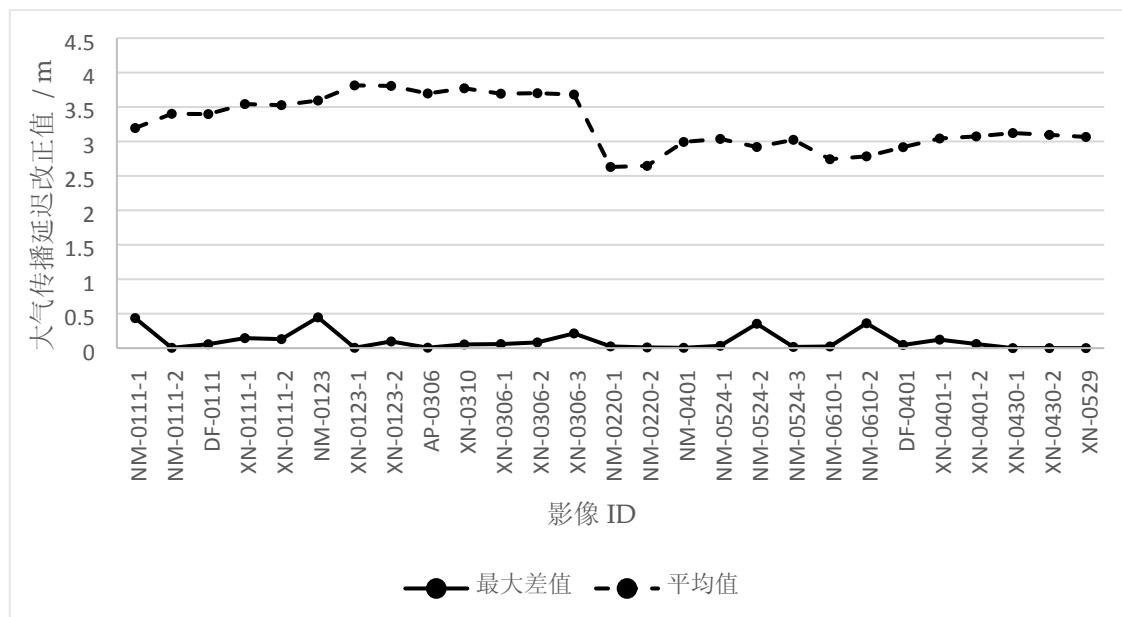


图 5.8 大气传播延迟改正值的变化

Fig. 5.8 Variation in correction values in the range direction

5.3.2 控制点精度分析

根据 3.3.2 节讨论的结论，单景 SAR 影像几何定标后的结果可以反映出控制点的提取精度。GF-3 号 SAR 影像的单景定标结果，如表 5.6 所示。

从表 5.6 的结果可以看出，由于登封地区的地面控制点是高精度自动角反射器，所以该地区 SAR 影像在单景几何定标后的几何定位精度相对较高，最高可达 0.074m。然而，其他地区选择典型地物特征点作为控制点，故单景几何定标后的几何定位精度相对较低。这是由于斑点噪声、影像分辨率和信噪比等因素的影响，造成在选取典型地物特征作为控制点时存在一定的选点误差。从表 5.6 的结果可以看出，在选取典型地物特征作为控制点的情况下，几何定位精度仍优于 0.5 个像素，由此说明选点误差在 0.5 个像素左右。另外，表 5.6 中最后三景 SAR 影像只有一个控制点，故单景几何定标后的几何定位精度均为 0 个像素。

表 5.6 GF-3 号单景定标结果

Tab. 5.6 Verification of geometric accuracy after single scene calibration

成像模式	时宽和带宽	影像 ID	Line (Pixel)	Sample (Pixel)	2-D (Pixel)
FSM_I (5 m 分辨率)	24.99 μs and 50 MHz	NM-0111-1	0.122	0.308	0.331
		NM-0111-2	0.091	0.179	0.201
		DF-0111	0.014	0.168	0.169
	30 μs and 50 MHz	XN-0111-1	0.121	0.353	0.373
		XN-0111-2	0.07	0.332	0.339
		NM-0123	0.114	0.17	0.205
FPSM_I (8 m 分辨率)	24.99 μs and 30 MHz	XN-0123-1	0.052	0.216	0.222
		XN-0123-2	0.189	0.437	0.476
		AP-0306	0.118	0.071	0.138
		XN-0310	0.079	0.359	0.367
		XN-0306-1	0.116	0.346	0.365
		XN-0306-2	0.15	0.192	0.243
		XN-0306-3	0.163	0.221	0.275
	24.99 μs and 40 MHz	NM-0220-1	0.064	0.253	0.261
		NM-0220-2	0.175	0.013	0.176
		NM-0401	0.343	0.102	0.358
		NM-0524-1	0.025	0.156	0.157
		NM-0524-2	0.086	0.233	0.249
		NM-0524-3	0.115	0.103	0.155
		NM-0610-1	0.086	0.24	0.255
		NM-0610-2	0.14	0.21	0.253
		DF-0401	0.073	0.008	0.074
		XN-0401-1	0.118	0.186	0.22
		XN-0401-2	0.144	0.36	0.388
		XN-0430-1	0	0	0
		XN-0430-2	0	0	0
		XN-0529	0	0	0

5.3.3 几何定标结果分析

针对 GF-3 号的 24.99 μs and 40 MHz 时宽带宽组合，利用 13 景 SAR 影像的几何定标参数结果分析 GF-3 号 SAR 卫星影像的系统误差，如图 5.9 和图 5.10 所示。

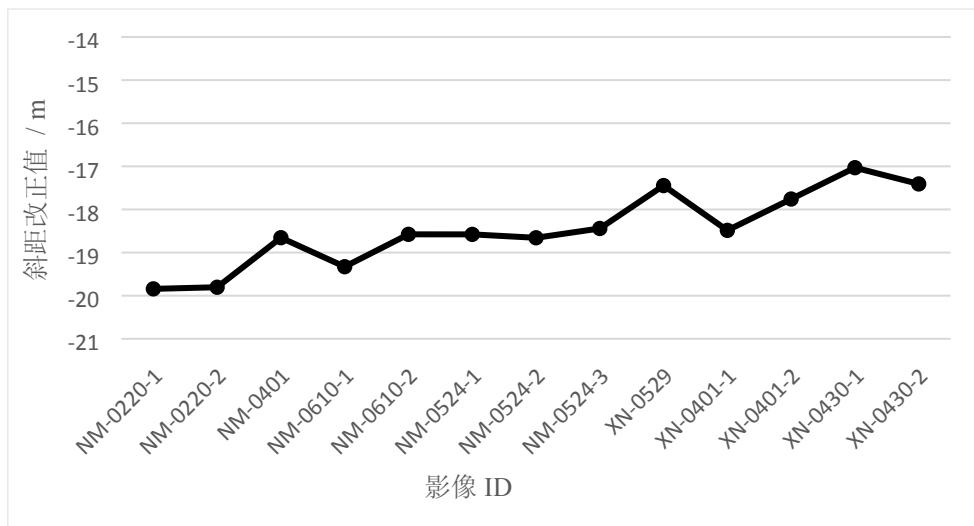


图 5.9 斜距改正值的变化

Fig. 5.9 Variation trend of correction values in the range direction

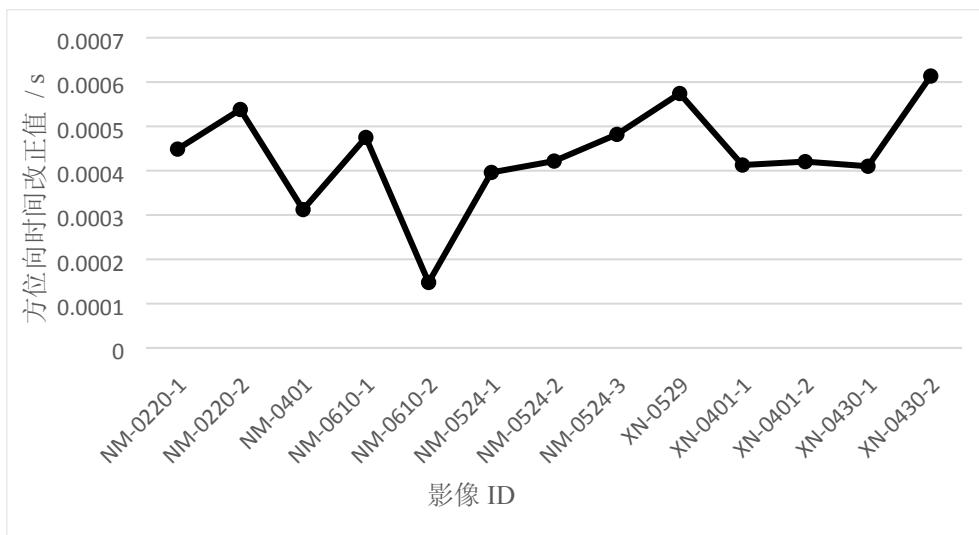


图 5.10 方位向时间改正值的变化

Fig. 5.10 Variation trend of correction values in the azimuth direction

由图 5.9 可知，斜距改正值的最大差值为 2.811m，均方根误差为 0.843m。由于距离向的像素间隔约为 2.25m，所以在像素尺度上斜距改正值最大差值为 1.25 像素，均方根误差为 0.37 像素。由图 5.10 可知，方位向时间改正值的最大差值为 0.000465751s，均方根误差为 0.000113152s。由于方位向的等效 PRF 约为 1216Hz，所以在像素尺度上方位向时间改正值的最大差值为 0.57 像素，均方根误差为 0.14 像素。结果表明，斜距改正值和方位向时间改正值的变化趋势基本稳定。由此说明，GF-3 号 SAR 卫星影像存在一定量级的系统误差。

表 5.7 GF-3 号补偿几何定标参数前后的几何定位精度对比

Tab. 5.7 Comparison of geometric positioning accuracy before and after correcting for geometric calibration parameters

成像模式	时宽和带宽	影像 ID	几何定标	方位向	距离向	2-D	
				(Pixel)	(Pixel)	(Pixel)	(m)
FSM_I (5 m 分辨率)	24.99 μ s and 50 MHz	NM-0111-1	定标前	0.463	9.679	9.690	21.802
		NM-0111-1	定标后	0.176	1.217	1.230	2.781
	30 μ s and 50 MHz	NM-0111-2	定标前	0.528	9.840	9.854	22.175
		NM-0111-2	定标后	0.106	1.121	1.126	2.537
QPSM_I (8 m 分辨率)	24.99 μ s and 30 MHz	XN-0123-1	定标前	0.432	10.452	10.461	23.540
		XN-0123-1	定标后	0.301	0.505	0.588	1.481
	24.99 μ s and 40 MHz	XN-0123-2	定标前	0.525	9.940	9.954	22.412
		XN-0123-2	定标后	0.301	0.441	0.534	1.374
AP-0306	24.99 μ s and 30 MHz	AP-0306	定标前	0.655	5.211	5.252	23.663
		AP-0306	定标后	0.136	0.264	0.296	1.366
	NM-0220-1	NM-0220-1	定标前	0.549	9.997	10.013	22.686
		NM-0220-1	定标后	0.079	1.018	1.021	2.330
NM-0220-2	NM-0220-2	NM-0220-2	定标前	0.677	9.983	10.007	22.763
		NM-0220-2	定标后	0.186	0.969	0.986	2.413
	NM-0401	NM-0401	定标前	0.531	9.628	9.643	21.824
		NM-0401	定标后	0.410	0.469	0.623	2.379
NM-0524-1	NM-0524-1	NM-0524-1	定标前	0.482	9.613	9.625	21.778
		NM-0524-1	定标后	0.112	0.451	0.465	1.190
	NM-0524-2	NM-0524-2	定标前	0.520	9.599	9.613	21.774
		NM-0524-2	定标后	0.116	0.515	0.528	1.324
NM-0524-3	NM-0524-3	NM-0524-3	定标前	0.597	9.546	9.564	21.717
		NM-0524-3	定标后	0.115	0.377	0.394	1.061
	NM-0610-1	NM-0610-1	定标前	0.584	9.817	9.834	22.208
		NM-0610-1	定标后	0.088	0.794	0.799	1.850
NM-0610-2	NM-0610-2	NM-0610-2	定标前	0.228	9.507	9.510	21.413
		NM-0610-2	定标后	0.435	0.473	0.642	2.632

针对实验区的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据，开展四组几何定标试验与精度验证。（1）针对 24.99 us & 50 MHz 组合，以河南省登封市的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据作为定标数据，将求解的固定系统误差补偿内蒙古托克托县的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据；（2）针对 30 us & 50 MHz 组合，以内蒙古托克托县的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据作为定标数据，将求解的固定系统误差补偿湖北省咸宁市的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据；（3）针对 24.99 us & 30 MHz 组合，以湖北省咸宁市的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据作为定标数据，将求解的固定系统误差补偿河北省安平县的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据；（4）针对 24.99 us & 40 MHz 组合，以湖北省咸宁市的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据作为定标数据，将求解的固定系统误差补偿内蒙古托克托县和河南省登封市的 GF-3 号 SAR 卫星影像数据。精度验证结果如表 5.7 所示。

从表 5.7 的结果可以看出，经过几何定标后，GF-3 号的 FSM_I 模式和 QPSM_I 模式的最大几何定位误差分别为 2.871m 和 2.632m，且几何定位误差在 1.061m 和 2.781m 之间。几何定位精度基本稳定，说明实验结果是可靠的，GF-3 号 SAR 卫星的几何定位精度优于 3m。另外，实验数据的成像时间范围大约是 5 个月，说明 GF-3 号 SAR 卫星在此期间的几何定位性能相对稳定。

5.4 YG-13 号与 GF-3 号的交叉几何定标与精度验证

为了验证本文提出的基于同名点约束的交叉几何定标方法，采用河南省嵩山定标场区域的 YG-13 号和 GF-3 号影像进行验证分析。

表 5.8 交叉几何定标实验数据

Tab. 5.8 Experimental data of cross geometric calibration

组合模式	成像卫星	成像时间	成像模式	时宽带宽组合	轨道	左右侧视	中心视角
同侧	YG-13	20160329	条带	24.4 μ s & 200 MHz	升	右	38.01°
	GF-3	20170111	精细条带 1	24.99 μ s & 50 MHz	升	右	40.07°
异侧	YG-13	20160119	条带	24.4 μ s & 200 MHz	升	左	37.51°
	YG-13	20160329	条带	24.4 μ s & 200 MHz	升	右	38.01°
	GF-3	20170401	全极化条带 1	24.99 μ s & 40 MHz	升	右	30.56°

其中，YG-13号SAR影像数据作为参考SAR卫星数据，GF-3号影像数据作为待定标SAR卫星数据。该地区具有航空测量获取的高精度DEM数据，高程精度优于1.5m。采用YG-13号和GF-3号相近入射角的SAR影像，验证相同入射角情况下的交叉几何定标精度；采用YG-13号两次以相近入射角通过异侧成像获得的SAR影像和不同入射角的GF-3号SAR影像，验证不同入射角情况下的交叉几何定标精度。实验数据情况，如表5.8所示。

5.4.1 同名点定位精度分析

角反射点在不同视向的SAR影像中均呈现“十”字形亮点，且其提取精度较高。为了验证本文提出的基于同名点约束的交叉几何定标方法，本文采用角反射器点作为同名点，降低控制点提取精度对交叉几何定标结果的影响。

根据4.3.2节中的交叉几何定标求解步骤5），计算同名点（角反射器点）的物方坐标，并与其真实坐标进行对比，结果如表5.9所示。

由5.2节的实验结果可知，在无高程误差的情况下，YG-13号SAR卫星条带模式影像的几何定位精度优于3m。表5.9中根据当地高精度DEM数据求解的高程误差为0.8m左右，理论上由此引入的投影差约为1.024m。从表5.9中可知，计算得到的经纬度误差均小于4m，由此说明结果合理。

表 5.9 同名点定位精度对比

Tab. 5.9 Comparison of location accuracy of the same points

组合模式	卫星影像	点号	纬度误差	经度误差	高程误差
同侧	YG-13 20160329	102	0.00000001° (0.0011m)	0.00000120° (0.1101m)	-0.7730
		105	0.00000195° (0.2171m)	0.00000090° (0.0826m)	-0.7330
	YG-13 20160119	102	0.00001301° (1.4483m)	0.00001920° (1.7610m)	-0.7260
		102	0.00000001° (0.0011m)	0.00000120° (0.1101m)	-0.7730

5.4.2 入射角差异影响分析

由理论部分分析结果可知, 入射角差异是影响交叉几何定标精度的重要因素。根据每个同名点所在 YG-13 号 SAR 卫星影像中的入射角, 计算同名点的入射角之差, 并结合上面计算得到的高程误差, 从理论上分析由同名点入射角差异导致高程误差引入的投影差影响, 结果如表 5.10 所示。

表 5.10 同名点的投影差

Tab. 5.10 The projective difference of the same points

组合模式	卫星影像	点号	入射角差 (°)	高程误差 (m)	投影差 (m)
同侧	YG-13 & GF-3	102	4.393	-0.7730	0.1192
		105	4.405	-0.7330	0.1135
异侧	YG-13 & YG-13	102	0.719	-0.7260 -0.7730	0.0308

由表 5.10 的结果可知, 由同名点入射角差异导致高程误差引入的投影差影响均小于 0.2m。而 GF-3 号的精细条带 1 模式的分辨率为 5m, 全极化条带 1 模式的分辨率为 8m, 由此可知, 投影差影响基本可以忽略不计。

5.4.3 交叉几何定标结果分析

根据 YG-13 号 SAR 卫星影像计算得到的同名点物方坐标, 采用本文提出的基于同名点约束的交叉几何定标方法对 GF-3 号 SAR 卫星影像的几何定标参数进行解算, 与利用地面控制点的解算结果进行对比, 结果如表 5.11 所示。

表 5.11 交叉几何定标和有场几何定标解算结果对比

Tab. 5.11 Comparison of results between cross-calibration and field-calibration

成像卫星	成像时间	时宽带宽 组合	定标 方式	斜距改正差值 (m)	方位向时间改正差值 (s)
GF-3	20170111	24.99 μs & 50 MHz	同侧	0.8021	0.0000175833 (0.1184m)
GF-3	20170401	24.99 μs & 40 MHz	异侧	2.2156	0.00004228945 (0.2851m)

由表 5.11 的结果可知, 交叉几何定标和有场几何定标的结果最大相差 2.3m 左右。这是由于, GF-3 号 SAR 卫星的交叉几何定标精度, 受到参考 SAR 卫星--YG-13 号的几何定位精度限制。为进一步验证交叉几何定标精度, 采用与 GF-3 号有场几何定标相同的验证区域影像进行验证分析, 结果如表 5.12 所示。

表 5.12 GF-3 号交叉几何定标精度验证结果

Tab. 5.12 Verification results of cross geometric calibration accuracy for GF-3

成像模式	时宽和带宽	影像 ID	几何定标	方位向	距离向	2-D	
				(Pixel)	(Pixel)	(Pixel)	(m)
FSM_I (5 m 分辨率)	24.99 μs and 50 MHz	NM-0111-1	定标前	0.463	9.679	9.690	21.802
			定标后	0.208	0.877	0.901	2.056
		NM-0111-2	定标前	0.528	9.840	9.854	22.175
			定标后	0.132	0.771	0.782	1.772
QPSM_I (8 m 分辨率)	24.99 μs and 40 MHz	NM-0220-1	定标前	0.549	9.997	10.013	22.686
			定标后	0.064	1.987	1.988	4.482
		NM-0220-2	定标前	0.677	9.983	10.007	22.763
			定标后	0.209	1.954	1.965	4.546
		NM-0401	定标前	0.531	9.628	9.643	21.824
			定标后	0.383	1.447	1.496	3.813
		NM-0524-1	定标前	0.482	9.613	9.625	21.778
			定标后	0.063	1.417	1.419	3.206
		NM-0524-2	定标前	0.520	9.599	9.613	21.774
			定标后	0.090	1.463	1.466	3.327
		NM-0524-3	定标前	0.597	9.546	9.564	21.717
			定标后	0.124	1.352	1.358	3.116
		NM-0610-1	定标前	0.584	9.817	9.834	22.208
			定标后	0.094	1.759	1.761	3.989
		NM-0610-2	定标前	0.228	9.507	9.510	21.413
			定标后	0.386	1.424	1.476	3.851

由表 5.12 的结果可以看出, 利用基于同名点约束的交叉几何定标方法, 以 YG-13 号 SAR 卫星为参考星, GF-3 号 SAR 卫星经过交叉几何定标后, 其无控几何定位精度均优于 4.6m。虽然该结果比有场几何定标精度差一些, 但是对于 GF-3 号 SAR 卫星来说, 仍

可以满足优于 1 个像素的几何定位精度。由此说明，本文提出的基于同名点约束的交叉几何定标方法是有效的，解决了星载 SAR 几何定标对几何定标场的依赖，为我国 SAR 卫星常态化几何定标和周期性在轨质量检测提供了有效技术支撑。

5.5 平面与立体精度评价

几何精度主要可以分为平面精度和高程精度，因此，本文从单景正射纠正和立体 SAR 测量两个方面，评价 YG-7 号卫星影像的几何精度。首先，采用四角布设控制点的方式，在 YG-7 号 SAR 卫星影像内选取与 ZY-3 号光学影像的同名点，再利用 ZY-3 号卫星影像的数字地表模型(Digital Surface Model, DSM)和 DOM 产品提取同名点坐标，对 YG-7 号 SAR 影像进行正射纠正，并与基于角反射器点的正射纠正结果进行对比分析。然后，针对引起星载 SAR 影像几何畸变的误差源的不确定性，通过基于 RPC 模型的区域网平差模型对国产 SAR 卫星影像的适用性进行验证，并对稀少控制点情况下的平差精度进行评价；最后，采用密集点匹配方法对 YG-7 号立体影像数据进行影像匹配，生成 DSM，评价 YG-7 号的立体 SAR 测量精度。

5.5.1 平面定位精度评价

为了验证本文提出的基于光学遥感影像的控制点获取方法的有效性，采用以下两种实验方案进行对比分析：

方案 1：以角反射器点作为控制点的正射纠正。利用 RPC 模型对资源三号三线阵影像数据进行立体平差，对资源三号前、后视影像构建立体像对并制作高精度的 DSM。结合角反射器点的像面坐标和地面坐标，采用四角布控的方法求解仿射变换参数，分别对阎良地区和蒲城地区的 YG-7 号 SAR 影像进行正射纠正。

方案 2：基于资源三号卫星影像选取控制点的正射纠正。利用方案 1 制作的高精度 DSM，对资源三号正视影像进行正射纠正。再通过在 SAR 影像的四角区域寻找同名像点，利用 ZY-3 号卫星影像的 DSM 和 DOM 产品提取同名点坐标，分别对阎良和蒲城地区的 YG-7 号 SAR 影像进行正射纠正。

为了提高精度验证的可靠性，实验均以野外布设的角反射器点作为检查点，对两种方案的 SAR 正射影像精度进行评价。

(1) SAR 影像定向实验

针对阎良地区和蒲城地区的 YG-7 号 SAR 影像，分别采用方案 1 和方案 2 进行单景定向实验，结果如表 5.13 和表 5.14 所示。

表 5.13 阎良地区 YG-7 号 SAR 影像单景定向精度

Tab. 5.13 The single-image orientation accuracy of YG-7 SAR image in Yanliang area

方案	控制点 个数	检查点 个数	控制点精度 (pixels)			检查点精度 (pixels)		
			x	y	平面	x	y	平面
方案 1	4	3	0.028	0.302	0.303	0.440	0.709	0.834
	7	0	0.277	0.415	0.500	—	—	—
方案 2	4	7	0.535	0.550	0.768	1.142	1.214	1.667
	11	0	0.672	0.711	0.978	—	—	—

表 5.14 蒲城地区 YG-7 号 SAR 影像单景定向精度

Tab. 5.14 The single-image orientation accuracy of YG-7 SAR image in Pucheng area

方案	控制点 个数	检查点 个数	控制点精度 (pixels)			检查点精度 (pixels)		
			x	y	平面	x	y	平面
方案 1	4	5	0.054	0.070	0.088	0.353	0.413	0.543
	9	0	0.171	0.242	0.296	—	—	—
方案 2	4	9	0.035	0.287	0.289	1.438	0.591	1.555
	13	0	0.720	0.375	0.812	—	—	—

通过表 5.13 和表 5.14 实验结果可以看出，在 SAR 影像四角点布控控制点的情况下，两种方案的定向精度最高，分别优于 0.9 个像素和 1.7 个像素，由此说明 4 个控制点可以很好地消除了各景 SAR 影像存在的系统误差。根据 3.4.2 的分析结果，方案 2 的全部控制点定向结果较差，说明相比方案 1 的选点误差大，故方案 1 比方案 2 的单景定向精度高。

(2) SAR 影像正射纠正实验

针对阎良和蒲城两个地区的 YG-7 号 SAR 影像，采用两种方案分别进行正射纠正实验，精度对比如表 5.15 和表 5.16 所示。

通过表 5.15 和表 5.16 结果可以看出，两种实验方案的正射纠正结果与单景定向结果基本一致。对于平原地区的 YG-7 号 SAR 影像，采用方案 1 的正射纠正精度优于 2.5m，采用方案 2 的正射纠正精度优于 4.5m。这是由于方案 2 相比方案 1 的选点误差大，故采用方案 2 比方案 1 的正射纠正精度差。但是，采用方案 2 的 YG-7 号 SAR 影像正射纠正精度仍可以满足 1:1 万测图需求。由此可以说明，本文提出的基于光学遥感影像的控制点获取方法是有效的，可以有效弥补无法拍摄角反射器区域的星载 SAR 影像进行高精度正射纠正的需求。

表 5.15 阎良地区 SAR 影像正射纠正精度

Tab. 5.15 The Ortho-rectification accuracy of SAR image in Yanliang area

ID	方案 1 差值 (m)			方案 2 差值 (m)		
	DX	DY	平面	DX	DY	平面
5102	—	—	—	-3.419	-1.900	3.911
5103	—	—	—	2.817	-5.532	6.208
5105	-2.914	0.627	2.980	-1.572	3.205	3.570
5106	-0.865	0.012	0.865	-1.823	-4.210	4.588
5107	—	—	—	3.988	2.472	4.692
5108	-2.490	0.502	2.5396	-1.148	3.080	3.287
5109	—	—	—	3.746	-4.015	5.491
误差均值	±2.268	±0.464	±2.315	±2.530	±3.646	±4.502

表 5.16 蒲城地区 SAR 影像正射纠正精度

Tab. 5.16 The Ortho-rectification accuracy of SAR image in Pucheng area

ID	方案 1 差值 (m)			方案 2 差值 (m)		
	DX	DY	平面	DX	DY	平面
5202	—	—	—	2.089	4.313	4.792
5204	2.549	2.233	3.389	-2.878	2.232	3.642
5205	1.965	1.321	2.368	-1.262	3.3197	3.552
5206	2.326	0.004	2.326	3.499	2.003	4.032
5207	—	—	—	-3.502	-1.972	4.019
5208	1.551	0.761	1.728	-1.676	2.76	3.229
5209	—	—	—	-2.185	-2.207	3.106
5210	2.304	0.115	2.307	-3.123	-1.886	3.648
误差均值	±2.167	±1.211	±2.482	±2.577	±2.707	±3.742

(3) 误差分析

由 2.1 节和 2.4 节分析可知, 采用地面控制点可以消除单景 SAR 影像内的大部分系统误差。由于星载 SAR 系统是斜距成像, 地形起伏引起 SAR 影像产生阴影、叠掩和透视收缩等变形现象, 由此, 高程误差是影响正射纠正精度的主要误差源。

如图 5.11 所示, 地面高程误差 Δh 引起的定位误差为,

$$\Delta r = \frac{\Delta h}{\tan \theta} \quad (5.107)$$

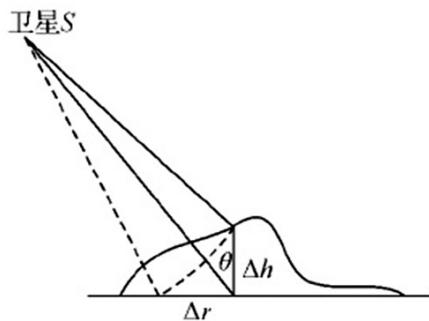
图 5.11 高程误差引起的定位误差^[67]

Fig. 5.11 The positioning error by error of height

经验证可知，实验区域的资源三号 DSM 产品的高程精度约为 1.50m，根据雷达入射角估计因高程误差引起的 YG-7 号 SAR 影像的几何定位误差，结果如表 5.17 所示。

表 5.17 高程误差引起的定位误差

Tab. 5.17 The positioning error by error of height

地区	入射角	定位误差
阎良	30.02°	2.60m
蒲城	44.54°	1.52m

由表 5.13 和表 5.14 可知，两个地区的 YG-7 号影像定向精度分别为 1.67 和 1.56 个像素误差；结合表 5.17 可知，正射纠正影像的理论精度应分别在 2.41~7.61m 和 3.16m~6.20m 之间。对比表 5.15 和表 5.16 可以看出，此次实验的正射纠正结果是合理的。

5.5.2 立体定位精度评价

为了验证基于 RPC 模型的区域网平差模型对国产 SAR 卫星影像的适用性，以及半全局匹配（Semi-global Matching, SGM）图像匹配方法对国产 SAR 卫星影像进行匹配的适用性，通过以下四个实验进行分析，对比评价不同获取方式的国产星载 SAR 立体测量精度。

（1）交会角对立体 SAR 区域网平差的影响

由上分析可知，交会角影响立体 SAR 区域网平差结果。因此，下面通过相对定向精度对不同交会角的 YG-7 号立体 SAR 区域网平差结果进行分析。

基于 RPC 模型, 通过自由网平差计算连接点的物方坐标, 再由物方坐标反算像方坐标, 与量测坐标进行差值计算, 统计各连接点误差值, 计算连接点的像方中误差, 即相对定向精度, 如表 5.18 所示。

表 5.18 不同交会条件的 YG-7 号立体 SAR 相对定向精度对比

Tab. 5.18 Comparison of relative orientation precision of YG-7 stereo SAR with different intersection conditions

立体像对	交会角	平差模型	像方中误差 (pixel)		
			距离向	方位向	平面
6335_010_003	5.7°	立体平差	20.792	13.874	24.996
7029_001_017		平面平差	0.867	1.099	1.400
3624_018_006	10.9°	立体平差	1.115	38.192	38.208
7029_001_017		平面平差	0.484	0.459	0.667
3624_018_006	14.5°	立体平差	0.062	0.480	0.484
9113_001_004		平面平差	0.675	0.510	0.845
6335_010_003	16.6°	立体平差	0.032	0.729	0.730
3624_018_006		平面平差	1.034	0.885	1.361
4275_001_009	61.8°	立体平差	0.092	0.363	0.375
7029_001_017		平面平差	4.827	0.730	4.882
4275_001_009	71.6°	立体平差	0.101	0.437	0.449
3624_018_006		平面平差	6.289	1.025	6.372

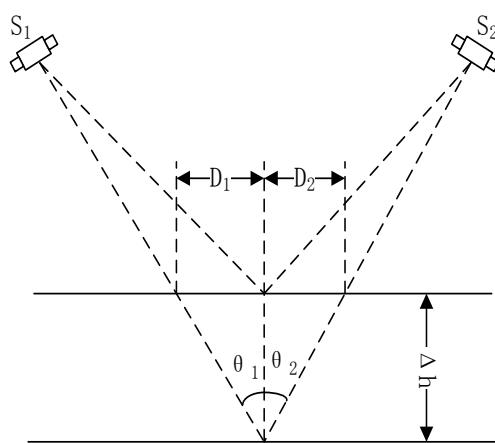


图 5.12 平面平差时高程误差引起的投影差

Fig. 5.12 Projection error caused by elevation error in plane adjustment

从表 5.18 的结果可以看出, 前两组的平面平差结果优于立体平差结果, 均优于 1.5 个像素; 而后面四组的立体平差结果优于平面平差结果, 均优于 1.9 个像素。这是因为利用平面平差时, 高程误差引起平面的投影差 D_1 和 D_2 , 如图 5.12 所示。投影差随交会角 $(\theta_1 + \theta_2)$ 的增大而变大。故最后两组的平面平差结果比第三、四组的平面平差结果差。综上可知, 对于 YG-7 号立体 SAR 测量, 交会角小于 10.9° 时, 应采用平面平差^[131]的方法; 交会角大于 14.5° 时, 应采用立体平差^[131]的方法。

(2) 不同立体 SAR 区域网平差模型的精度评价

实验采用基于 RPC 模型以 2 参数、4 参数和 6 参数的像方补偿模型作为立体 SAR 区域网平差模型进行立体定向分析, 根据最小二乘平差法分别求解像方补偿模型参数, 获得立体定向结果, 如表 5.19 所示。

表 5.19 YG-7 不同立体 SAR 区域网平差模型精度对比

Tab. 5.19 Accuracy Comparison of Different Stereo Adjustment Models of YG-7

立体像对	控制点 /个	检查点 /个	平差模型	中误差 (m)	
				平面	高程
6335_010_003	4	8	2 参数	303.931	153.646
			4 参数	10.961	7.138
			6 参数	11.911	8.067
3624_018_006	4	8	2 参数	308.893	292.410
			4 参数	6.624	5.558
			6 参数	5.308	3.676
3624_018_006	4	8	2 参数	284.859	152.470
			4 参数	6.254	4.972
			6 参数	6.242	3.536
9113_001_004	4	8	2 参数	133.731	124.741
			4 参数	8.273	7.025
			6 参数	7.377	6.353
6335_010_003	4	12	2 参数	225.810	110.060
			4 参数	6.244	4.356
			6 参数	5.609	4.546
3624_018_006	4	11	2 参数	132.683	125.150
			4 参数	4.696	3.684
			6 参数	4.441	3.769

从表 5.19 可以看出, 2 参数的平差精度较差, 仍存在很大的系统误差未消除; 4 参数和 6 参数的平差结果明显提高, 但 6 参数的平差精度比 4 参数的平差精度略高些。这说明, 在影像的沿轨方向和垂轨方向上主要存在着平移误差和比例误差, 同时存在少量的旋转误差, 可以被交叉补偿参数吸收。另外, 在立体 SAR 区域网平差模型相同的情况下, 异侧成像获取立体像对的立体平差精度相对较高, 平面精度可达 4.441 米, 高程精度可达 3.769 米。

综上, 可以说明利用六参数 $(e_0, e_1, e_2, f_0, f_1, f_2)$ 构建的仿射变换模型作为像方补偿模型, 可以很好地消除 RPC 模型的系统误差, 适用于基于 RPC 模型的 YG-7 号立体 SAR 区域网平差。

(3) 稀少控制点下的立体平差精度评价

针对稀少控制点的情况下, 基于 RPC 模型的 6 参数仿射变换模型进行国产立体 SAR 区域网平差实验, 立体 SAR 区域网平差结果如表 5.20 所示。

表 5.20 稀少控制点情况下 YG-7 号立体 SAR 区域网平差结果

Tab. 5.20 Stereo Adjustment Results with few control points for YG-7

立体像对 获取方式	控制点 个数	检查点 个数	最大残差 (m)		中误差 (m)	
			平面	高程	平面	高程
6335_010_003	1	7	786.530	-985.655	452.424	540.104
	2	6	273.526	8.626	201.644	5.697
7029_001_017	3	5	15.020	-11.582	11.345	7.956
	1	7	229.804	-99.503	159.740	60.548
3624_018_006	2	6	141.759	-68.240	102.630	48.781
	3	5	12.189	8.555	8.527	5.348
3624_018_006	1	7	9.680	9.229	8.097	5.002
	2	6	14.326	11.068	8.354	4.910
9113_001_004	3	5	16.418	12.044	8.743	5.839
	1	11	18.056	10.909	8.605	6.456
6335_010_003	2	10	11.919	-8.825	8.117	5.788
	3	9	16.441	-11.989	7.991	6.908
4275_001_009	1	10	519.309	-99.604	273.001	47.031
7029_001_017	2	9	109.154	-21.503	72.223	12.080

	3	8	9.292	-7.492	5.205	3.646
4275_001_009	1	15	7.591	-8.406	3.948	3.927
3624_018_006	2	14	7.551	-8.035	4.149	3.842
	3	13	8.341	-6.283	4.096	3.286

通过表 5.20 可以看出，利用 1-2 个控制点的平差结果不稳定；而在 3 个控制点的情况下，同侧成像模式的平面精度优于 12m，高程精度优于 8m，异侧成像模式的平面精度优于 8m，高程精度优于 4m。由此可知，至少需要 3 个控制点才可以精确进行立体 SAR 区域网平差。

(4) 不同获取方式的 DSM 精度评定

为了获得更好的效果，本文采用 SGM 图像匹配方法^[165]。半全局算法是全局算法的简化，通过 8 个或 16 个方向代价的和得到近似全局最优的匹配结果。在每条累积路径上，本点当前视差的累积代价为本点代价和路径上前一个像素的累积代价及视差相关。其中，代价函数采用三元统计变换 (Ternary Census Transform, TCT)^[166]，TCT 的窗口大小为 5×5 像素。为了提高匹配的可靠性，核线影像采用基于 RPC 模型的投影轨迹法^[167]获得。SGM 算法是一个逐像素匹配的算法，为了提高匹配的速度、提高内存使用效率，通常采用分块匹配和多级金字塔匹配的策略，通过逐级匹配减少每一级匹配的搜索范围，提高内存使用效率和匹配的速度。另外，采用分块处理对每一级进行匹配，利用每块影像之间的重叠度消除由周边像元不可靠的匹配结果引起的缝隙。其中，分块大小为 4096×4096 像素，重叠范围为 128×128 像素。然后，根据每个像素的视差和相关系数，逐点计算每个像素的三维坐标，生成规则格网间隔的 DSM。最后，提取的 DSM 与 ZY-3 生成的 DSM 进行逐像素对比，评价高程精度。

YG-7 号的 6 个立体像对生成的 DSM 效果对比，如图 5.13 所示。为了对比特征地物，每幅图的左侧为 ZY-3 生成的 DSM，右侧为 YG-7 生成的 DSM。

从图 5.13 可以看出，ZY-3 与 YG-7 的 DSM 效果基本一致。城市地区由于具有较好的相关性，匹配效果比较好。还有图 5.13 中的图 (e) 和图 (f)，河流匹配效果也比较明显。由于植被和庄稼地的相关性较差，导致生成的 DSM 存在大量的噪声。另一个影响相关性的是两个立体像对的成像时间差异。相比来看，由于两个立体像对成像的长时间间隔，导致了 SS2、SS3 和 SS4 生成的 DSM 效果差。然而，SS2 和 SS4 的成像时间间隔大约都是 7 个月左右，而 SS3 的成像时间间隔是 1 个月，因此 SS3 的匹配效果比其余两个立体像对好一些。尽管 SS1 的成像时间间隔仅有 6 天，但是由于交会角比较小，所以导致其匹配效果较差；尽管 OS1 的成像时间间隔为 7 个月，但由于较大交会角的存在，其获

得了比较好的匹配效果。整体来看，OS2 的成像时间间隔不仅短，而且交会角也比较大，所以其的匹配效果是最好的。为了具体评价 YG-7 的立体测量精度，ZY-3 与 YG-7 的 DSM 精度对比的最小值、最大值、平均值和均方根误差（Root-mean-square Error, RMSE）如表 5.21 所示，以及高程差的概率密度函数图如图 5.14 所示。

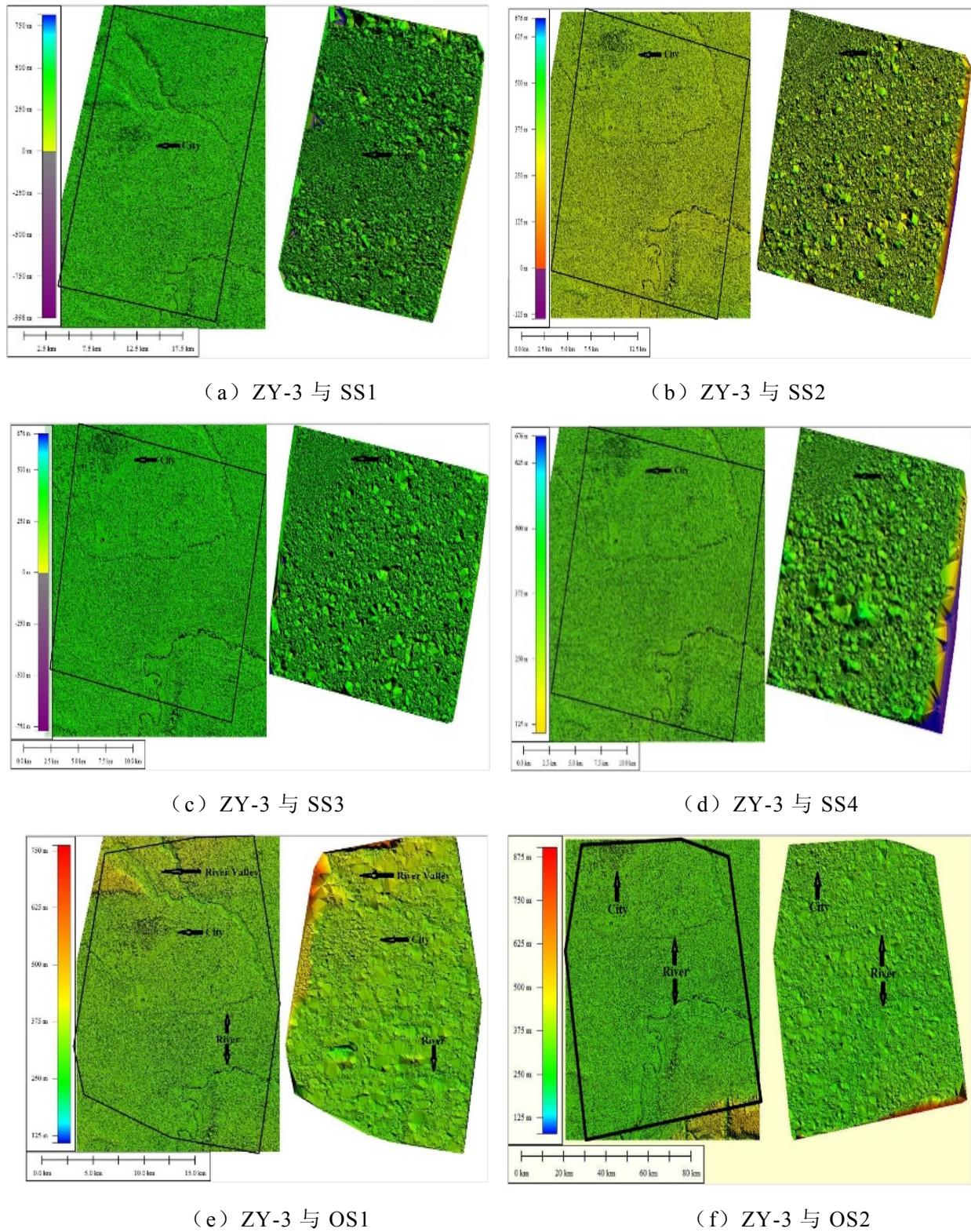


图 5.13 ZY-3 的 DSM（左侧）与 YG-7 的 DSM（右侧）对比图

Fig. 5.13 Comparison between DSMs of ZY-3 (on the left in all six cases) and the DSM of YG-18 (on the right in each case)

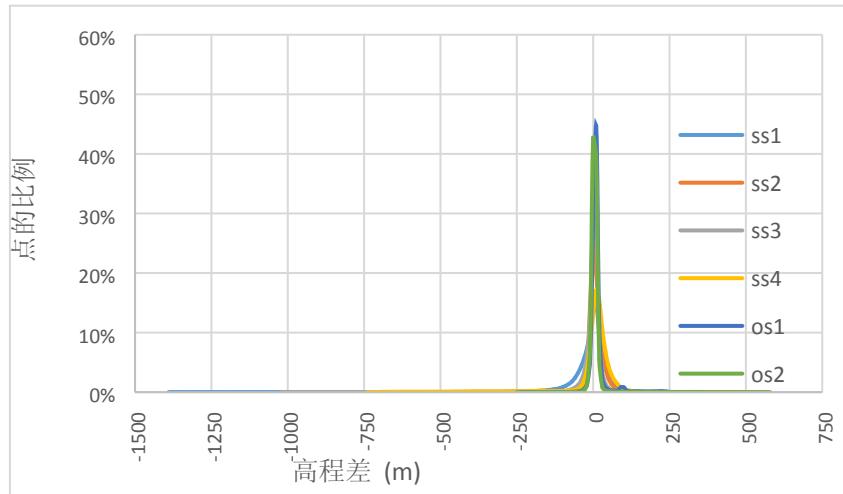


图 5.14 ZY-3 的 DSM 与 6 个 YG-7 立体像对生成 DSM 的高程差对比图

Fig. 5.14 Distribution map of elevation differences between the ZY-3 and YG-7 DSMs produced by the six stereopairs

表 5.21 YG-7 与 ZY-3 的 DSM 精度对比

Tab. 5.21 Comparison of DSM precision between YG-7 and ZY-3

立体像对 ID	高程误差 (m)			
	最小值	最大值	平均值	RMSE
SS1	-1391.95	311.14	-7.78	40.67
SS2	-574.75	248.85	12.88	27.92
SS3	-1102.67	284.96	-4.56	21.94
SS4	-741.14	234.90	11.33	34.33
OS1	-245.42	282.45	4.72	19.72
OS2	-259.33	573.04	-0.20	11.36

从图 5.14 中可以看出，YG-7 的 DSM 与 ZY-3 的 DSM 逐像素对比的高程差均在±50m 左右，而 SS1、SS2 和 SS4 的部分像素的高程差在±50m 到±100m 之间，极个别像素的高程差大于±100m。从表 5.21 可以看出，最小高程误差范围在-1392m 到-245m 之间，最大高程误差范围在 235m 到 573m 之间，但是平均的高程差在-8m 到 13m 之间，高程差

的 RMSE 在 11m 到 41m 之间。由此说明，表 5.21 和图 5.14 的结果基本一致，由于斑点噪声导致产生了一些误匹配点。另外，同侧获取 DSM 的高程精度可达到 22m，异侧获取 DSM 的高程精度可达到 11m，说明异侧立体 SAR 生产的 DSM 精度比同侧高。这个结果与式(2.80)的理论分析结果基本一致，所以实验结果真实可靠。

5.6 本章小结

本章以 YG-13 号和 GF-3 号 SAR 卫星为例，针对本文提出的几何定标理论与方法，进行了几何定标实验与精度分析，并与经典的几何定标方法进行了对比，验证了本文所提算法的正确性和有效性；以 YG-13 号 SAR 卫星为参考星，针对 GF-3 号 SAR 卫星利用本文提出的基于同名点约束的交叉几何定标方法处理后，其无控几何定位精度优于 4.6m，说明了本文所提方法的有效性；以 YG-7 号 SAR 卫星为例，从正射纠正和立体 SAR 测量两个角度，验证分析了国产 SAR 卫星的几何精度。

6 结论与展望

6.1 结论

长期以来，我国 SAR 卫星影像的几何处理精度不高，与国外相比存在巨大差距，已成为制约我国 SAR 卫星规模化应用的最大瓶颈。为了减小巨大差距，填补国产星载 SAR 高精度几何定标技术领域的空白，打破 SAR 卫星遥感应用长期依赖国外卫星数据的局面，论文主要研究了提升星载 SAR 几何定位精度的方法，从而弥补国产星载 SAR 硬件上的不足，提高国产 SAR 卫星数据的应用效果。

本文通过误差分析、模型构建，形成了国产 SAR 卫星高精度几何定标理论；研究了自动角反射器几何定标装置的研制方法和高精度角反射器点的提取方法，为我国建立 SAR 卫星常态化几何定标场提供技术支持；提出了顾及大气传播延迟的 SAR 卫星多模式几何定标方法，应用于我国高分辨率 SAR 卫星，全球无控制定位精度优于 3 米，使我国 SAR 卫星定位精度达到国际同类卫星先进水平，结束了国产 SAR 卫星几何精度长期低下的历史。具体来说，主要做了如下的工作：

(1) 构建并改进了国产 SAR 卫星几何定位模型和几何定标模型。

针对星载 SAR 系统，详细分析了星载 SAR 几何定位误差影响因素以及误差对几何定位的影响，构建了星载 SAR 卫星严密几何模型和通用几何模型，通过一种改进的 RD 模型数值解法，有效解决了大斜视成像条件下 RD 定位模型数值解法无解的问题；针对国产 SAR 卫星的 RPC 模型拟合严密几何模型精度不高的问题，研究了星载 SAR 卫星的虚拟重成像方法，有效地提升了 RPC 模型的拟合精度，且 RPC 模型的拟合精度优于 0.005 个像素；考虑大气空间环境变化对雷达信号的大气传播延迟影响，构建了高精度星载 SAR 几何定标模型，并研究了星载 SAR 几何定标参数的解算方法，详细分析了星载 SAR 几何定标精度的影响因素，通过分析不同成像条件、不同空间分布的大气传播延迟对几何定标精度的影响，充分说明针对逐个 SAR 影像、逐个控制点进行大气传播延迟改正，可以有效消除大气传播延迟影响的时变性，提升星载 SAR 几何定标精度。

(2) 提出了星载 SAR 影像高精度地面控制点的获取方法。

针对角反射器点作为 SAR 影像的控制点，通过一种远程控制、无人值守、高精度的自动角反射器设备设计方法，有效解决了传统人工布设角反射器存在成本高、效率低、周期长等问题，为实现我国 SAR 卫星常态化几何定标和周期性在轨运行状态监测提供有效技术支撑；控制点提取误差也是影响星载 SAR 几何定标精度的主要影响因素，基于亚像

元提取精度的质心法，采用一种“人工+算法”的高精度半自动提取角反射器点方法，通过仿真数据和实测数据验证，说明本文提出的方法可实现优于 0.1 个像素的点提取精度；针对无法拍摄几何定标场区域的星载 SAR 影像，采用一种基于光学遥感影像的控制点获取方法，提高了星载 SAR 影像控制点提取的精度和可靠性，有效补充了星载 SAR 影像控制点的获取手段。

(3) 提出了国产 SAR 卫星高精度几何定标方法。

从雷达信号特性与几何定位精度之间的关系出发，针对国产 SAR 卫星数据特点，采用一种顾及大气传播延迟的星载 SAR 多模式混合几何定标方法，通过根据雷达信号的时宽和带宽组合进行分类定标，提升了国产星载 SAR 几何定标的精度和工作效率，并与国内外研究的经典星载 SAR 几何定标方法进行了优缺点对比，弥补了我国星载 SAR 几何定标方法研究领域的空白。

(4) 提出了基于同名点约束的交叉几何定标方法。

为解决星载 SAR 卫星几何定标对高精度地面控制数据的依赖，基于 SAR 系统的斜距成像特性，理论分析了因入射角差异导致高程误差引起的投影差影响机理，研究了基于同名点约束的交叉几何定标方法。以 YG-13 号 SAR 卫星为参考星，针对 GF-3 号 SAR 卫星利用本文提出的基于同名点约束的交叉几何定标方法处理后，其无控几何定位精度优于 4.6m，说明了本文所提方法的有效性，为我国 SAR 卫星常态化几何定标和周期性在轨质量检测提供了有效技术支撑。

(5) 分析验证了国产 SAR 卫星的几何定位精度。

以 YG-13 号卫星和 GF-3 号卫星为例，针对本文提出的国产 SAR 卫星高精度几何定标方法，利用中国嵩山遥感卫星定标场的常态化定标设备进行了实验和分析，并结合国内不同区域（如山西太原、河北安平、湖北咸宁、天津等地区）的地面控制数据，验证了国产 SAR 卫星经几何定标后的无控几何定位精度，实验结果表明无控几何定位精度均优于 3 米。最后，基于本文提出的虚拟重成像方法构建 RPC 模型，对国产 YG-7 号卫星影像数据的平面和高程精度进行了评价和分析，验证了本文提出算法的正确性和有效性，通过实验结果和误差分析表明，YG-7 号卫星影像的正射纠正精度优于 2.5m，立体 SAR 获取 DSM 的高程精度可达 11m。

本文的主要创新点有：

(1) 发明了一种远程控制、无人值守的高精度自动角反射器，并基于质心法提出了一种半自动高精度角反射器点提取方法，实现快速获取星载 SAR 影像高精度控制点。

(2) 提出了顾及大气传播延迟的星载 SAR 多模式混合几何定标方法。根据雷达信号的时宽和带宽组合确定几何定标方案，创新采用全球大气环境参考数据（NCEP 和 CODE）消除时变误差对 SAR 卫星几何定标的影响，有效提升星载 SAR 系统的几何定位精度。

(3) 首次提出了基于同名点约束的星载 SAR 交叉几何定标方法。利用相同入射角条件下可消除因高程误差引起的投影差的原理，实现在无地面控制点情况下的星载 SAR 高精度几何定标。

6.2 下一步工作展望

国内高分辨率 SAR 卫星正朝着超高分辨率、高轨道、双/多基 SAR 等方向快速发展，这为国产 SAR 卫星几何定位精度提升研究带来了新的机遇和挑战。本文所提方法，虽然可为目前在轨运行和后续高分辨率和高轨道等国产 SAR 卫星高精度几何处理提供一定基础，但仍存在一些问题有待进一步研究，主要包括：

(1) 超高分辨率 SAR 卫星几何定标。几何定位精度不仅影响 SAR 卫星影像产品的后续应用，在高分辨率星载 SAR 成像方面，其还会直接影响 SAR 卫星影像的超高分辨率实现，这就对星载 SAR 几何定标技术的精度要求更高。一方面，通过对大气传播延迟改正精度、控制点提取精度等提出更高的指标要求，另一方面，可以通过考虑 SAR 卫星系统性能的不稳定性和卫星姿态抖动等影响，开展动态参数检测与补偿研究。

(2) 高轨 SAR 卫星几何定标。由于高轨 SAR 卫星的轨道高度很高，受电离层延迟影响较为严重，尤其是随机的电离层闪烁影响，因此需要针对高轨 SAR 开展电离层延迟改正的研究。

(3) 双/多基 SAR 卫星几何定标。由于双/多基 SAR 卫星是单发多收或者多发多收的复杂成像模式，在单基 SAR 卫星几何定标基础上，需要考虑卫星间的时间同步误差、相位同步误差等影响，确保双/多基 SAR 卫星影像的几何定位精度。

参 考 文 献

- [1] 张永生, 王涛, 张云彬. 航天遥感工程[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 彭希隆, 赵红, 范永弘, 等. 基于 GPS/IMU 的红外影像直接定位技术[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(4):285-288.
- [3] 李文梅, 李增元, 陈尔学, 等. 层析 SAR 反演森林垂直结构参数现状及发展趋势[J]. 遥感学报, 2014, 18(4):741-751.
- [4] 靳国旺. InSAR 地形测绘若干问题研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(5):668.
- [5] 王爱春, 向茂生, 汪丙南. 城区地表形变差分 TomoSAR 监测方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(12):1413-1422.
- [6] 王品清, 刘刚, 李邦良. 陆地卫星 TM 及 JERS-1 卫星 SAR 数据用于西藏东部斑岩铜矿勘查[J]. 国土资源遥感, 1997, 9(2):54-62.
- [7] 杨浩. 基于时间序列全极化与简缩极化 SAR 的作物定量监测研究[D]. 中国林业科学研究院, 2015.
- [8] 李文梅, 李增元, 陈尔学, 等. 层析 SAR 反演森林垂直结构参数现状及发展趋势[J]. 遥感学报, 2014, 18(4):741-751.
- [9] 赵现斌, 严卫, 王迎强, 等. 基于海面散射模型的全极化合成孔径雷达海洋环境探测关键技术参数设计仿真研究[J]. 物理学报, 2014, 63(21):410-420.
- [10] 陈艳玲, 黄诚, 丁晓利, 等. ERS-2 SAR 反演海洋风矢量的研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6):1688-1694.
- [11] Kobayashi T, Kim J H, Lee S R, et al. Synthetic Aperture Radar Processing of Kaguya Lunar Radar Sounder Data for Lunar Subsurface Imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(6):2161-2174.
- [12] 海琴. 时序雷达干涉测量探测汶川地震龙门山区滑坡的时空分布特征[D]. 西南交通大学, 2015.
- [13] 黄世奇, 王善成. 微波遥感 SAR 军事探测技术研究[J]. 飞航导弹, 2005, (4):13-16.
- [14] Farr T. Seasat-A 25-year legacy of success[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(3):384-404.
- [15] NISHIDAI T. Early results from ‘Fuyo-1’ Japan’s Earth Resources Satellite (JERS-1)[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(9):1825-1833.
- [16] Satake M, Fujita M, Hanado H, et al. Calibration experiments of ERS-1 SAR with active radar calibrator in Japan[A]. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation[C]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, USA, 1994, 4:2209-2211.

- [17] Zandbergen R, Dow J M, Merino M R, et al. ERS-1 and ERS-2 tandem mission: Orbit determination, prediction and maintenance[J]. Advances in Space Research, 1997, 19(11):1649-1653.
- [18] Parashar S, Langham E, McNally J, et al. RADARSAT Mission Requirements and Concept[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2014, 19(4):280-288.
- [19] 王振力, 钟海. 国外先进星载 SAR 卫星的发展现状及应用[J]. 国防科技, 2016, 37(1):19-24.
- [20] Shimada M. Radiometric and geometric calibration of JERS-1 SAR[J]. Advances in Space Research, 1996, 17(1):79-88.
- [21] Srivastava, S. K, Le D, et al. RADARSAT-1 image quality and calibration- Continuing success in extended mission[J]. Advances in Space Research, 2003, 32(11):2295-2304.
- [22] Srivastava S K, Cote S, Dantec P L, et al. RADARSAT-1 calibration and image quality evolution to the extended mission[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(1):7-12.
- [23] Flamini E, Wall S. Cassini Radar: Expectations and results after three years of operations[A]. Radar Conference[C]. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008:1-4.
- [24] Jordan R L, Caro E R, Kim Y, et al. Shuttle radar topography mapper (SRTM)[A]. Proceedings SPIE vol. 2958[C]. Conference on Microwave Instrumentation for Remote Sensing of the Earth II, Taormina, Italy, 1996:412-422.
- [25] Buyukalih G, Kocak G, Oruc M. Geometric accuracy evaluation of the DEM generated by the Russian TK-350 stereo scenes using the SRTM X- and C-band interferometric DEMs[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(11):1295-1301.
- [26] 万杰, 廖静娟, 许涛, 等. 基于 ICESat/GLAS 高度计数据的 SRTM 数据精度评估——以青藏高原地区为例[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(1):100-105.
- [27] Williams D, Ledantec P, Chabot M, et al. RADARSAT-2 Image Quality and Calibration Update[A]. Proceedings of EUSAR 2014[C]. 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014:1-4.
- [28] Brautigam B, Schwerdt M, Bachmann M, et al. Results from geometric and radiometric calibration of TerraSAR-X[J]. European Radar Conference, 2007, 33(4):87-90.
- [29] Schwerdt M., Brautigam B., Bachmann M., et al. TerraSAR-X Calibration Results[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2008, 2(2007-12):205-208.
- [30] Schwerdt M, Brautigam B, Bachmann M, et al. Final results of the efficient TerraSAR-X calibration method[J]. IEEE Radar Conference, 2008, 6805:1-6.
- [31] Arikawa Y, Suzuki S. First result from ALOS-2 operation[J]. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III, 2014, 9264(45): 8691-8694.
- [32] Schubert A, Small D, Meier E, et al. Spaceborne SAR product geolocation accuracy: A Sentinel-1 update[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)[C]. 2014 IEEE International, Quebec City, Canada, 2014:2675-2678.

- [33] Schubert A, Small D, Miranda N, et al. Sentinel-1A Product Geolocation Accuracy: Commissioning Phase Results[J]. *Remote Sensing*. 2015, 7(7): 9431-9449.
- [34] 常本义, 高力. IECAS 高分辨率机载合成孔径雷达几何精度试验[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(5):945-949.
- [35] 赵良玉. 环境一号卫星 [EB/OL].: <http://baike.baidu.com/item/环境一号卫星>.
- [36] 刘淼. 高分专项工程高分三号卫星成功发射 [EB/OL].: http://www.gov.cn/xinwen/2016-08/10/content_5098702.htm.
- [37] 李德仁, 张过, 蒋永华, 等. 国产光学卫星影像几何精度研究[J]. *航天器工程*, 2016, 25(1):1-9.
- [38] Brown E W. Application of SEASAT SAR Digitally Corrected Imagery for Sea Ice Dynamics[A]. In: American Geophysics[C]. Geophys Union Spring 1981 Meeting, Baltimore, USA, 1981:25-29.
- [39] Curlander J C. Location of spaceborne SAR imagery[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1982, GE-20(3):359-364.
- [40] Wivell C E, Steinwand D R, Kelly G G, et al. Evaluation of terrain models for the geocoding and terrain correction, of synthetic aperture radar (SAR) images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1992, 30(6):1137-1144.
- [41] 袁孝康. 星载合成孔径雷达的目标定位方法[J]. *上海航天*, 1997,(6):51-57.
- [42] 袁孝康. 星载合成孔径雷达目标定位误差分析[J]. *航天电子对抗*, 1998, (2):13-18.
- [43] 袁孝康. 星载遥感器对地面目标的定位[J]. *上海航天*, 2000, (3):1-8.
- [44] 袁孝康. 星载合成孔径雷达目标定位研究[J]. *上海航天*, 2002, (1):1-7.
- [45] 周金萍, 唐伶俐, 李传荣. 星载 SAR 图像的两种实用化 R-D 定位模型及其精度比较[J]. *遥感学报*, 2001, 5(3):191-197.
- [46] 刘国祥, 丁晓利, 李志林, 等. 星载 SAR 复数图像的配准[J]. *测绘学报*, 2001, 30(1):60-66.
- [47] 陈尔学. 星载合成孔径雷达影像正射校正方法研究[D]. 中国林业科学研究院, 2004.
- [48] 张永红, 林宗坚, 张继贤, 等. SAR 影像几何校正[J]. *测绘学报*, 2002, 31(2):134-138.
- [49] 张永红. 合成孔径雷达成像几何机理分析及处理方法研究[D]. 武汉大学, 2001.
- [50] 杨杰. 星载 SAR 影像定位和从星载 InSAR 影像自动提取高程信息的研究[D]. 武汉大学, 2004.
- [51] 傅文学, 郭小方, 田庆久. 星载 SAR 距离-多普勒定位算法中地球模型的修正[J]. *测绘学报*, 2008, 37(1):59-63.
- [52] 魏钜杰, 张继贤, 黄国满, 等. TerraSAR-X 影像直接地理定位方法研究[J]. *测绘通报*, 2009, (9):11-14.

- [53] 魏钜杰, 张继贤, 赵争, 等. 稀少控制下 TerraSAR-X 影像高精度直接定位方法[J]. 测绘科学, 2011, 36(1):58-60.
- [54] 刘佳音, 韩冰, 洪文. 一种新的 SAR 图像斜距多普勒定位模型的直接解法[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5):716-721.
- [55] 唐新明, 张过, 祝小勇, 等. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证[J]. 测绘学报, 2012, 41(2):191-198.
- [56] 张过, 郑玉芝. 高分辨率星载 SAR 数据产品分级研究[J]. 遥感学报, 2015, 19(3):409-430.
- [57] 张过, 费文波, 李贞, 等. 用 RPC 替代星载 SAR 严密成像几何模型的试验与分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(3):264-270.
- [58] Zhang G, Fei W B, Li Z, et al. Evaluation of the RPC Model for Spaceborne SAR Imagery[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2010, 76(6):727-733.
- [59] Zhang G, Zhu X Y. A study of the RPC model of TerraSAR-X and COSMO-SKYMED SAR imagery[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37:321-324.
- [60] 秦绪文, 田淑芳, 洪友堂, 等. 无需初值的 RPC 模型参数求解算法研究[J]. 国土资源遥感, 2005, (4):7-10.
- [61] 秦绪文, 张过, 李丽. SAR 影像的 RPC 模型参数求解算法研究[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(4):349-355.
- [62] Eftekhari A, Saadatseresht M, Motagh M. A study on rational function model generation for TerraSAR-X imagery[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2013, 13(9):12030-12043.
- [63] Zhang G, Li Z, Pan H B, et al. Orientation of Spaceborne SAR Stereo Pairs Employing the RPC Adjustment Model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7):2782-2792.
- [64] 张过, 李贞. 基于 RPC 的 TerraSAR-X 影像立体定向平差模型[J]. 测绘科学, 2011, 36(6):146-148.
- [65] Zhang G, Qiang Q, Luo Y, et al. Application of RPC Model in Orthorectification of Spaceborne SAR Imagery[J]. Photogrammetric Record, 2012, 26(137SI):94-110.
- [66] 张过, 李德仁, 秦绪文, 等. 基于 RPC 模型的高分辨率 SAR 影像正射纠正[J]. 遥感学报, 2008, 12(6):942-948.
- [67] 张过, 墙强, 祝小勇, 等. 基于影像模拟的星载 SAR 影像正射纠正[J]. 测绘学报, 2010, 39(6):554-560.
- [68] 刘军, 张永生, 王冬红. 基于 RPC 模型的高分辨率卫星影像精确定位[J]. 测绘学报, 2006, 35(1):30-34.

- [69] 刘军, 王冬红, 刘敬贤, 等. 利用 RPC 模型进行 IKONOS 影像的精确定位[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(3):228-234.
- [70] Zuo-wei H, Shu H. A Method for Improving Positioning Accuracy of SAR Imagery Based on RFM[J]. International Conference on Digital Manufacturing and Automation (ICDMA), 2013, 20:43-46.
- [71] Capaldo P, Crespi M, Fratarcangeli F, et al. A radargrammetric orientation model and a RPCs generation tool for COSMO-SkyMed and TerraSAR-X High Resolution SAR[J]. Italian Journal of Remote Sensing, 2012, 44(1):55-67.
- [72] Fei W B, Zhang G, Li Z. Application of RPC Model for InSAR Phase Evaluation[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)[C]. 2011 IEEE International, Vancouver, Canada, 2011:1693-1695.
- [73] Zhang G, Fei W B, Li Z, et al. Evaluation of the RPC Model as a Replacement for the Spaceborne InSAR Phase Equation[J]. Photogrammetric Record, 2011, 26(135):325-338.
- [74] Zhang L, He X Y, Balz T, et al. Rational function modeling for spaceborne SAR datasets[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2011, 66(1):133-145.
- [75] Wu Y, Ming Y. Using Rfm for Simultaneous Positioning of Multi-Sensor Spaceborne Sar Imagery[J]. Photogrammetric Record, 2013, 28(143):312-323.
- [76] Sekhar K S S, Kumar A S, Dadhwal V K. Geocoding RISAT-1 MRS images using bias-compensated RPC models[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(20):7303-7315.
- [77] 郭德明, 徐华平, 李景文. 高分辨率星载斜视 SAR 的姿态导引[J]. 宇航学报, 2011, 32(5):1130-1135.
- [78] Ye X, Kaufmann H, Guo X. Differential SAR interferometry using corner reflectors[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, 2:1243-1246.
- [79] Ye X, Kaufmann H. Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-InSAR and corner reflectors[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2004, 70(10):1167-1172.
- [80] Biancardi P, Iannini L, D'Alessandro M M, et al. Performances and limitations of Persistent Scatterers-based SAR calibration[J]. IEEE International Radar Conference, 2010, 29(16):762-766.
- [81] D'Aria D, Ferretti A, Monti Guarnieri A, et al. SAR calibration aided by permanent scatterers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4):2076-2086.
- [82] Bu L J, Zhang G, Lin Y S, et al. PSF Estimation in SAR Imagery Restoration Based on Comer Reflectors[J]. IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing (PIC), 2010, 2:804-808.
- [83] Yu B, Liu G X, Li Z L, et al. Subsidence detection by TerraSAR-X interferometry on a network of natural persistent scatterers and artificial corner reflectors[J]. Computers and Geosciences, 2013, 58:126-136.

- [84] Fan J H, Xia Y, Zhao H L, et al. Monitoring of landslide deformation based on the coherent targets of high resolution InSAR Data[A]. Proceedings of the SPIE vol. 9158[C]. 18th National Symposium on Remote Sensing of China, Beijing, China, 2014:7.
- [85] 赵俊娟. 构造形变监测中人工角反射器的 RCS 模拟[D]. 上海大学, 2012.
- [86] Riccio D, Martino G D, Iodice A, et al. Calibration of COSMO-SkyMed SAR data for hydrology applications[J]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012, 147(2):844-847.
- [87] 熊文秀, 冯光财, 李志伟, 等. 顾及时空特性的 SBAS 高质量点选取算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(11):1246-1254.
- [88] 王磊, 张钧萍, 张晔. 基于特征的 SAR 图像与光学图像自动配准[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(1):22-25.
- [89] 张登荣, 俞乐, 蔡志刚. 基于面特征的光学与 SAR 影像自动匹配方法[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6):843-847.
- [90] 许金萍, 彭仲宇. 基于 GCP 库的星载 SAR 图像自动精校正[J]. 测绘科学, 2009, 34(5):107-109.
- [91] 任芙蓉. 基于 SAR 图像模拟的控制点自动提取[D]. 解放军信息工程大学, 2009.
- [92] 李莹莹, 吴昊, 俞雷, 等. 高分辨率 SAR 和可见光图像同名点自动匹配技术[J]. 测绘通报, 2014, (5):66-70.
- [93] 许可乐, 唐涛, 蒋咏梅. 一种 SAR 图像稳健特征点提取方法[J]. 智能系统学报, 2013, 8(4):287-291.
- [94] 王山虎, 尤红建, 付琨. 基于大尺度双边 SIFT 的 SAR 图像同名点自动提取方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(2):287-293.
- [95] 姜丽敏, 陈曙暄, 向茂生. 面向 InSAR 稀疏控制点测图的同名点提取方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(12):2837-2845.
- [96] 薛笑荣, 王爱民, 曾琪明. 基于图像模拟的 SAR 图像角反射器检测方法研究[J]. 安阳师范学院学报, 2009, (5):69-72.
- [97] 闫世勇. 角反射器雷达干涉实验及在形变监测中的应用[D]. 河北工程大学, 2009.
- [98] 邢学敏, 朱建军, 汪长城, 等. 一种新的 CR 点目标识别方法及其在公路形变监测中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(6):699-703.
- [99] 贾辉. 高精度星敏感器星点提取与星图识别研究[D]. 国防科学技术大学, 2010.
- [100] Salomon P, Goss W. A microprocessor-controlled CCD star tracker[A]. AIAA Meeting Papers[C]. 14th Aerospace Sciences Meeting, Washington, USA, 1976:12.
- [101] Stanton A R H, Alexander J W, Dennison E W, et al. Astros: A sub-arcsec CCD star tracker[J]. Technical Symposium, 1984, 501(6):256-282.

- [102] Shalom E, Alexander J W, Stanton R H. Acquisition and track algorithms for the Astros star tracker[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 1985, 57:375-398.
- [103] Stanton R H, Alexander J W, Dennison E W, et al. Optical tracking using charge-coupled devices[J]. *Optical Engineering*, 1987, 26(9):930-938.
- [104] 胡晓东, 胡强, 雷兴, 等. 一种用于白天星敏感器的星点质心提取方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2014, 22(4):481-485.
- [105] Schwerdt M, Brautigam B, Bachmann M, et al. Final TerraSAR-X Calibration Results Based on Novel Efficient Methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(2):677-689.
- [106] Bachmann M, Schwerdt M, Brautigam B. TerraSAR-X Antenna Calibration and Monitoring Based on a Precise Antenna Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(2):690-701.
- [107] Brautigam B, Gonzalez J H, Schwerdt M, et al. TerraSAR-X Instrument Calibration Results and Extension for TanDEM-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 48(2):702-715.
- [108] Small D, Holzner J, Raggam H, et al. Geometric performance of ENVISAT ASAR products[J]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003, 2:1121-1123.
- [109] Schubert A, Jehle M, Small D, et al. Influence of atmospheric path delay on the absolute geolocation accuracy of TerraSAR-X high-resolution products[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2010, 48(2):751-758.
- [110] Calabrese D, Cricenti A, Grimani V, et al. COSMO-SkyMed: Calibration & Validation resources and activities[A]. *Radar Conference[C]*. IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008:1-6.
- [111] Toutin T, Chénier R, Schmitt C, et al. Calibration of radargrammetric DEMs from RADARSAT-2 high-resolution and fine-quad modes[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009, 5(3):41-43.
- [112] Mohr J J, Madsen S N. Geometric calibration of ERS satellite SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4):842-850.
- [113] Fritz T, H. B, B. S, et al. TerraSAR-X Image Products: Characterization and Verification[A]. *European Synthetic Aperture Radar (EUSAR)[C]*. 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008:1-4.
- [114] Shimada M, Isoguchi O, Tadono T, et al. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12):3915-3932.
- [115] Schwerdt M, Schmidt K, Tous Ramon N, et al. Independent Verification of the Sentinel-1A System Calibration[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(3):994-1007.

- [116] Small D, Rosich B, Meier E, et al. Geometric calibration and validation of ASAR imagery[A]. CEOS WGCV SAR Calibration & Validation Workshop[C]. CEOS SAR Workshop, At Ulm, Germany, 2004:1-8.
- [117] Jiang Y, Zhang G. Research on the Methods of Inner Calibration of Spaceborne SAR[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. 2011 IEEE International, Vancouver, Canada, 2011:914-916.
- [118] Zhou X, Zeng Q, Jiao J, et al. Field Calibration and Validation of RADARSAT-2[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. 2013 IEEE International, Melbourne, Australia, 2014:4451-4454.
- [119] 周晓, 曾琪明, 焦健. TerraSAR-X 传感器定标精度及其应用分析[J]. 遥感信息, 2014, 29(2):31-35.
- [120] 周晓, 曾琪明, 焦健, 等. 星载 SAR 传感器外场定标实验研究——以 TerraSAR-X 卫星为例[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(5):711-718.
- [121] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar Systems and signal processing[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1991.
- [122] 张过, 李贞, 王霞, 等. 高分辨率 SAR 卫星标准产品分级体系研究[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [123] 潘红播, 张过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星传感器校正产品几何模型[J]. 测绘学报, 2013, 42(4):516-52.
- [124] 蒋永华, 张过, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星三线阵影像高精度几何检校[J]. 测绘学报, 2013, 42(4):523-529.
- [125] Li F K, Held D N, Curlander J C, et al. Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic-Aperture Radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(1):47-56.
- [126] 王睿. 星载合成孔径雷达系统设计与模拟软件研究[D]. 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2003.
- [127] 须海江. 星载合成孔径雷达图像目标定位研究[D]. 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2005.
- [128] 陈尔学, 李增元. 分析法和数值解算法相结合的星载 SAR 直接定位算法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(8):1105-1109.
- [129] 王新洲, 刘丁酉, 张前勇, 等. 谱修正迭代法及其在测量数据处理中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 2001, 15(2):3-6.
- [130] 张过, 潘红播, 唐新明, 等. 资源三号测绘卫星长条带产品区域网平差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9):1098-1102.

- [131] 汪韬阳, 张过, 李德仁, 等. 资源三号测绘卫星影像平面和立体区域网平差比较[J]. 测绘学报, 2014, 43(4):389-395.
- [132] Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, et al. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length[J]. Radio science, 1985, 20(6):1593-1607.
- [133] 欧吉坤. GPS 测量的中性大气折射改正的研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(1):34-39.
- [134] Puysségur B, Michel R, Avouac J P. Tropospheric phase delay in interferometric synthetic aperture radar estimated from meteorological model and multispectral imagery[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2007, 112(B05419):1-12.
- [135] Owens J C. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition[J]. Applied Optics, 1967, 6(1):51.
- [136] 常亮. 基于 GPS 和美国环境预报中心观测信息的 InSAR 大气延迟改正方法研究[J]. 测绘学报, 2011, 40(5):669.
- [137] Jehle M, Perler D, Small D, et al. Estimation of Atmospheric Path Delays in TerraSAR-X Data using Models vs. Measurements[J]. SENSORS, 2008, 8(12):8479-8491.
- [138] Cong X Y, Balss U, Eineder M, et al. Imaging Geodesy-Centimeter-Level Ranging Accuracy With TerraSAR-X: An Update[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(5):948-952.
- [139] Eineder M, Minet C, Steigenberger P, et al. Imaging geodesy—Toward centimeter-level ranging accuracy with TerraSAR-X[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2011, 49(2):661-671.
- [140] Grodecki J, Dial G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Functions[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2003, 69(1):59-70.
- [141] 刘明军. 利用 Radarsat 立体影像提取 DEM 摄影测量方法研究[D]. 武汉大学, 2004.
- [142] Toutin T. Error tracking of radargrammetric DEM from RADARSAT images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(51):2227-2238.
- [143] 葛大庆. 区域性地面沉降 InSAR 监测关键技术研究[D]. 中国地质大学(北京), 2013.
- [144] 张婷, 张鹏飞, 曾琪明. SAR 定标中角反射器的研究[J]. 遥感信息, 2010, (3):38-42.
- [145] 莫锦军, 袁乃昌. SAR 校准常用参考目标分析和比较[J]. 航天返回与遥感, 1999, 20(2):10-16.
- [146] 赵俊娟, 尹京苑, 李成范. 基于 FEKO 平台的人工角反射器 RCS 模拟[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(8):79-81.
- [147] 谌华. CRInSAR 大气校正模型研究及其初步应用[D]. 中国地震局地质研究所, 2006.
- [148] 袁孝康. 星载合成孔径雷达的辐射校准[J]. 上海航天, 1998, (4):13-19.
- [149] 姜山, 王国栋, 王化深. 三角形三面角反射器加工公差对其单站 RCS 影响研究[J]. 航空兵器, 2006, (4):24-27.

- [150] 田忠明, 郭琨毅, 盛新庆. 角反射器表面粗糙度对单站 RCS 的影响[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(10):1227-1230.
- [151] 杨成生, 侯建国, 季灵运, 等. InSAR 中人工角反射器方法的研究[J]. 测绘工程, 2008, 17(4):12-14.
- [152] Bamler R, Eineder M. Accuracy of differential shift estimation by correlation and split-bandwidth interferometry for wideband and delta-k SAR systems[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2005, 2(2):151-155.
- [153] Dam T M V, Wahr J M. Displacements of the Earth's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 1987, 92(B2):1281-1286.
- [154] Dong D, Fang P, Bock Y, et al. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS - derived site position time series[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2002, 107(B4):1-9.
- [155] 刘冠男. 固体潮对油气运移的影响研究[D]. 成都理工大学, 2015.
- [156] Eanes R J, Schutz B, And Tapley B. Earth and ocean tide effects on Lageos and Starlette[A]. Proceedings of the Ninth International Symposium on Earth Tides E[C]. The Ninth International Symposium on Earth Tides, Stuttgart, Germany, 1983:239-249.
- [157] Wahr J M. The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth[J]. Geophysical Journal International, 1981, 64(3):705-727.
- [158] McCarthy D D, Petit G. IERS Conventions (2003)[J]. Iers Technical Note, 2004, 32:95.
- [159] 吴云龙. GOCE 卫星重力梯度测量数据的预处理研究[D]. 武汉大学, 2010.
- [160] 仇晓兰, 韩传钊, 刘佳音. 一种基于持续运动模型的星载 SAR 几何校正方法[J]. 雷达学报, 2013, 2(1):54-59.
- [161] 墙强. 基于 RPC 模型的星载高分辨率 SAR 影像正射纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [162] 撒文彬, 王海涛, 姜岩, 等. 相控阵天线色散误差对高分辨率星载 SAR 成像质量的影响研究[J]. 上海航天, 2016, (4):38-44.
- [163] 廖明. 色散延迟线在相控阵中的应用研究[D]. 南京理工大学, 2016.
- [164] Skolnik Merrill I. 雷达手册 (第三版) 中文版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [165] Gorbachev V A. Dense terrain stereoreconstruction using modified SGM[J]. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2014, 53(2):212-223.
- [166] Ferstl D, Riegler G, Ruether M, et al. CP-Census: A Novel Model for Dense Variational Scene Flow from RGB-D Data[A]. Proceedings of the British Machine Vision Conference[C]. British Machine Vision Conference, At Nottingham, United Kingdom, 2014:1-11.
- [167] 张过, 潘红播, 江万寿, 等. 基于 RPC 模型的线阵卫星影像核线排列及其几何关系重建[J]. 国土资源遥感, 2010, (4):1-5.

作 者 简 历

一、基本情况

姓名：赵瑞山 性别：男 民族：汉 出生年月：1987-03 籍贯：辽宁省阜新市
2005-09—2009-06，毕业于辽宁工程技术大学测绘工程专业，获学士学位；
2009-09—2012-01，毕业于辽宁工程技术大学大地测量学与测量工程专业，获工学硕士学位；
2012-09 至今，就读于辽宁工程技术大学大地测量学与测量工程专业，攻读博士学位。

二、在学期间从事的科研工作

1. 国产 InSAR 卫星指标论证与仿真技术. 测绘地理信息公益性行业科研专项, 编号: 201512022, 2015-01—2016-12, 负责几何模型建立、几何定标、星载 SAR 成像、自动角反射器设备研制等工作；
2. 高分三号 SAR 图像数据预处理软件开发. 国家海洋局第二海洋研究所项目, 编号: 2015-031, 2015-09—2016-12, 主要负责 SAR 图像滤波软件研发等工作；
3. 高轨 20 米 SAR 卫星几何和辐射定标与图像校正研究技术要求. 中国空间技术研究院项目, 编号: 501-01-2016-1036, 2016-09—2017-12, 负责高轨 SAR 几何模型建立、定位误差分析和几何定标等工作；
4. 自动角反射器设备研制. 国家重点实验室 2017 年科研仪器设备经费项目, 编号: 420100033, 2017-01—2019-12, 主要负责自动角反射器设备整体设计和组织研发等工作；
5. 顾及大气传播延迟的分布式 SAR 卫星几何定标. 卫星测绘技术与应用国家测绘地理信息局重点实验室课题, 编号: KLSMTA-201707, 2017-06—2018-12, 主要负责分布式 SAR 卫星几何定标算法研究、软件研发等工作；
6. 高分辨率 SAR 卫星地面形变监测与地下水-地面沉降模型研究. 辽宁省教育厅重点实验室基础研究项目, 编号: LJZS001, 2016-04—2017-12, 主要负责星载 SAR 几何模型研究等工作。

三、在学期间发表的学术论文

1. **Ruishan Zhao**, Yonghua Jiang, Guo Zhang, Mingjun Deng, Fan Yang. Geometric Accuracy Evaluation of YG-18 Satellite Imagery based on RFM [J]. Photogrammetric Record, 2017, 32(157):33-47. (SCI, Impact Factor: 3.256)
2. **Ruishan Zhao**, Guo Zhang, Mingjun Deng, Yang Fan, Zhenwei Chen, Yuzhi Zheng. Multimode hybrid geometric calibration of spaceborne SAR considering atmospheric propagation delay [J]. Remote Sensing. 2017, 9(5):464. (SCI, Impact Factor: 3.244)
3. **Ruishan Zhao**, Guo Zhang, Mingjun Deng, Kai Xu, and Fengcheng Guo. Geometric Calibration and Accuracy Verification of the GF-3 Satellite [J]. Sensors. 2017, 17(9):1977. (SCI, Impact Factor: 2.677)
4. 赵瑞山, 张过, 杨帆, 邵阳. 基于中值滤波的 DSM 在星载 SAR 影像正射纠正中的应用[J]. 测绘科学 (专刊), 2014, 39:86-88.
5. 赵瑞山, 张过, 杨帆. 利用光学遥感影像进行星载 SAR 影像正射纠正[J]. 测绘通报, 2016, (10):16-20.

6. 赵瑞山, 杨帆, 张过, 邵阳. 利用补偿 DSM 的星载 SAR 影像正射纠正[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(11):1178-1181.
7. 杨帆, 赵瑞山, 邹阳, 陈爽, 吴作启. GPS 水准综合模型在局部控制测量中的应用研究[J]. 测绘通报, 2012, (9):4-10.
8. Taoyang Wang, Guo Zhang, Lei Yu, **Ruishan Zhao**, Mingjun Deng and Kai Xu. Multi-Mode GF-3 Satellite Image Geometric Accuracy Verification Using the RPC Model [J]. Sensors. 2017, 17(9):2005. (SCI, Impact Factor: 2.677)
9. Yonghua Jiang, Kai Xu, **Ruishan Zhao**, Guo Zhang, Kan Cheng, Ping Zhou. Stitching images of dual-cameras onboard satellite [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017, 128:274-286. (SCI, Impact Factor: 6.387)
10. Taoyang Wang, Guo Zhang, Deren Li, **Ruishan Zhao**, Mingjun Deng, Tong Zhu and Lei Yu. Planar block adjustment and orthorectification of Chinese spaceborne SAR YG-5 imagery based on RPC[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39. (SCI, Impact Factor: 1.724)

四、在学期间申请的发明专利

1. 赵瑞山, 杨帆, 吴作启, 徐佳, 张羽. 一种基于小波包进行信号去噪的方法[P]. 中国, CN104615877A, 2015-5-20.
2. 赵瑞山, 杨帆, 吴作启, 徐佳. 一种基于中值滤波的 DSM 进行星载 SAR 影像正射纠正的方法[P]. 中国, CN104680488A, 2015-6-10.
3. 张过, 赵瑞山, 邓明军, 李少宁, 徐凯. 一种高精度星载 SAR 几何定标方法[P]. 中国, 201710539627.8, 2017-7-4.
4. 张过, 赵瑞山, 张浩, 邓明军, 陈振炜, 郑玉芝. 一种常态化运行的高精度自动角反射器系统[P]. 中国, 201710591723.7, 2017-7-19.

学位论文数据集

关键词*	密级*	中图分类号*	UDC	论文资助
星载 SAR; 几何定标; 多模式 混合几何定标; 交叉几何定 标; 自动角反射器	公开	P237	528.8	测绘地理信 息公益性行 业科研专项
学位授予单位名称*	学位授予单位代码*		学位类别*	学位级别*
辽宁工程技术大学	10147		工学	博士
论文题名*		并列题名*		论文语种*
星载 SAR 几何定标模型与方法研究		无		中文
作者姓名*	赵瑞山		学号*	471210027
培养单位名称*	培养单位代码*	培养单位地址		邮编
辽宁工程技术大学	10147	辽宁省阜新市		123000
学科专业*	研究方向*	学制*		学位授予年*
测绘科学与技术	微波遥感技术与应用	3		2017
论文提交日期*		2017 年 12 月		
导师姓名*	杨帆	职称*		教授
评阅人		答辩委员会主席*	答辩委员会成员	
		宋伟东 教授		
电子版论文提交格式 文本(√) 图像() 视频() 音频() 多媒体() 其他()				
推荐格式: application/msword; application/pdf				
电子版论文出版(发布)者	电子版论文出版 (发布)地		权限声明	
论文总页数*	140			
注: 共 33 项, 其中带*为必填数据, 为 22 项。				

七、查新结论

经国内文献检索，查到有关该课题的相关文献 4 篇（文献 1~3 为论文，文献 4 为专利）。文献 1 报道了合成孔径雷达外场定标实验方案与关键技术研究，针对大气延迟效应和地面参考点误差对于星载 SAR 亚米级几何定标精度的限制，提出了引入 IGS 站数据联合解算的大气延迟与地面参考点系统误差同步测量改正方法，文献 2 以 TerraSAR-X 卫星为例，报道了星载 SAR 传感器外场定标实验研究。文献 3 报道了星载 SAR 图像处理及应用研究。文献 4 公开了基于 SAR 严密成像模型的子像素级角反射器自动定位方法，实现了子像素级自动化的提取角反射器点坐标。

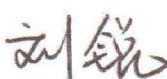
检索结果与查新点对比如下：

查新点 1 所述“基于质心法提出了一种半自动高精度角反射器点提取方法”，文献 4 提及子像素级自动提取角反射器点坐标的方法，但未提及采用质心法提取点坐标。

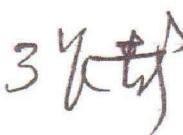
查新点 2 所述“根据雷达信号的时宽和带宽组合确定几何定标方案，提出了顾及大气传播延迟的星载 SAR 多模式混合几何定标方法”，文献 2、3 提及顾及大气传播延迟的星载 SAR 几何定标方法，但未提及综合考虑雷达信号的时宽和带宽因素。

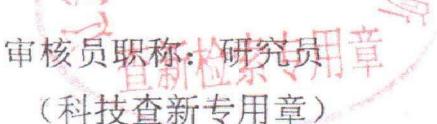
查新点 3 所述“利用相同入射角条件下可消除因高程误差引起的投影差的原理，提出了基于同名点约束的星载 SAR 交叉几何定标方法”，未见相关文献提及。

结论如下：该委托单位完成的以上述查新点为技术特点的“星载 SAR 几何定标模型与方法研究”，在国内文献检索中，未见相同研究的文献报道。

查新员：刘锐（签字）

查新员职称：工程师


审核员：张静（签字）

审核员职称：研究员


2017 年 10 月 20 日