

密级:_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

轻敏 SAR 卫星波束抖动导致成像畸变的运动补偿技术研究

学生姓名 庞岩

指导教师 梁旭文 研究员 张锐 研究员

学位类别 工学博士

学科专业 通信与信息系统

研究方向 星载合成孔径雷达

培养单位 中国科学院上海微系统与信息技术研究所

2016 年 5 月

**Research on the Motion Compensation of the Imagery Distortion of a
Space-borne Agile SAR System Due to the LOS jitters**

By

Pang Yan

**A Dissertation Submitted to
Graduate University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Philosophy**

Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology

May, 2016

致谢

随着本文即将完成，我的研究生学习生活也将落下帷幕，在此，我要对所有关心和帮助我的人表示深深的感谢。

首先，我要由衷地感谢我的导师梁旭文研究员，梁老师严谨的工作态度、渊博的学识对我影响很大，有幸成为他的学生是我一生的宝贵财富。本文的完成离不开梁老师长期的热心关怀和悉心指导，在此谨向梁老师致以最诚挚的感谢！

其次，我要感谢我的副导师张锐研究员，张老师在卫星姿控和平台技术等领域给予我很多帮助，他的指导保证了论文的完备性。

我还要感谢龚文斌老师和刘会杰老师，他们在通信、电子领域知识渊博，思维开阔，能够从全局把握问题，在学习中给予我很多帮助。

感谢马陆、丁晟、吕源、胡泽鑫、任前义、梁广、尚琳、肖寅、王斌、徐非、谢卓辰、赵璐璐、王勇勇、陈毅君、吴康、肖扬等所有师兄弟和师妹，谢谢你们在科研和学习中给予的关怀和帮助，以及共同营造的自由活跃的学习氛围。

感谢中科院上海微系统所研究生部以及上海微小卫星工程中心人事部的余翔波老师、周素华老师和贾冰清老师，你们分别从入所、离所和中间的学习阶段给予了我的关心和帮助，你们的付出和关怀温暖人心，你们是最可爱的人，在此表示由衷的感谢。

最后感谢我的妻子和父母，感谢你们这么多年对我的谅解和支持，给了我坚持下来的勇气！

轻敏 SAR 卫星波束抖动导致成像畸变的运动补偿技术研究

庞岩(通信与信息系统)

指导老师：梁旭文 研究员

摘要

轻型敏捷 SAR 卫星具有显著的成本优势和广阔的应用前景，但是存在成像中指向稳定度不足的问题。天线指向抖动会引起成像质量的下降，针对这一问题，本文研究了成像畸变的原理，分析了抖动与成像畸变的关系，并提出一系列抖动补偿和成像质量优化的方法。在轻敏 SAR 卫星抖动成像的特殊背景下，本文进行了以下研究：

- 1、调研轻敏 SAR 卫星、SAR 成像畸变、运动补偿技术等方向的研究现状；
- 2、对天线抖动成像的现有模型进行改进，建立了更精确的几何畸变和回波畸变模型；
- 3、通过理论推导排除了回波相位误差的干扰，并推导了点目标成像公式。以成像公式为基础，提出了高低频率划分依据，推导了抖动与畸变之间的量化关系，并通过仿真验证了理论的有效性。最后给出一种抖动阈值的计算方法，比现有方法在精度上有很大提高；
- 4、发现并解释了高频抖动成像的明暗条带畸变，推导了带有邻近点干扰效应的点目标成像公式，提出一种干扰强度的评价方法；
- 5、在抖动畸变分析的基础上，提出适用于高频抖动和低频抖动畸变的两种补偿算法。高频补偿以包络校正为基础，可以有效降低旁瓣畸变水平。低频补偿基于多普勒中心的动态调整，能提高回波能量的利用效率。通过仿真实证证明算法可以达到很好的补偿效果，经过补偿处理之后，系统对抖动也有更大的容忍度。
- 6、建立了抖动畸变仿真系统，该系统适用于多种 SAR 卫星模型和天线抖动模型的仿真分析。可用于计算成像畸变性能、抖动补偿性能等，对于轻敏 SAR 卫星系统的性能评估和总体方案设计有重要的意义。

关键词 合成孔径雷达 成对回波畸变 邻近点成像干扰 天线指向抖动 运动补偿

Research on the Motion Compensation of the Imagery Distortion of a Space-borne Agile SAR System Due to the LOS jitters

Pang Yan (Communication and Information System)

Directed by: Prof. Liang Xuwen

Abstract

A light-weight agile SAR satellite has a significant cost advantage and wide application prospect. But the lack of stability may lead to a deterioration of the imaging quality. In this dissertation, the reason of the imaging distortion was studied, quantitative relationship between jitter and imaging distortion is derived, and a method for motion compensation and image optimization is proposed. In the special background of a light-weight agile SAR satellite, this paper mainly study on the following aspects:

1 An investigation was made on the development of light-weight agile SAR satellite, analysis of SAR imaging distortions, algorithms for motion compensation and other related directions;

2 The echo model with antenna jitters is improved, and a new geometric distortion model and a jitter echo model are established;

3 The phase error in the echo signal is proved to be negligible, which leads to a simplification in the derivation of the impulse response function. A new expression of the imaging result of a single target is derived. Based on the new expression, the jitter frequency is divided into high and low parts, and the mathematical simulation is derived between the jitter and the distortion. The validity of these theories is proved by simulation experiments. Besides, a more accurate computing method for the threshold of jitters is introduced;

4 A phenomenon of macroscopically distortion is described and analyzed in the image with high frequency jitters. The expression of imaging result with adjacent interference is derived;

5 Compensating algorithms for higher and lower frequency are proposed based on analysis of the imaging distortions. In the higher frequency cases, distortions are compensated by envelope correction, which could effectively reduce the energy of

the side-lobe. In the lower frequency cases, compensation is based on dynamic adjustment of the Doppler centroid, which could increase utilization ratio of the echo energy. Moreover, the methods to increase the execution efficiency of the compensation are discussed. Simulation shows the performance of the algorithms.

6 A simulation system is set up for the echo generation and motion compensation with antenna jitters, which could be used for various types of satellite model and jitter modes. The output of the system contains echoes, distorted images, imaging results of compensation and so on. The system could be used in performance evaluation of the SAR system and the overall project design.

Keywords: SAR; paired echo distortion; LOS jitter; adjacent target interference; motion compensation

目 录

致谢	5
摘要	7
Abstract.....	9
1 第一章 绪论	15
1.1 课题研究背景与意义	15
1.2 轻型敏捷 SAR 是小卫星空间遥感的重要发展方向	15
1.2.1 轻敏 SAR 卫星的发展现状	16
1.2.2 敏捷平台能够增强 SAR 的遥感性能	16
1.2.3 轻敏 SAR 可卫星具有明显的成本优势	18
1.3 波束指向不稳定是轻敏 SAR 发展的瓶颈	20
1.3.1 卫星微振动现象	20
1.3.2 轻敏 SAR 卫星有更大的振动隐患	21
1.4 波束指向抖动影响及补偿的研究现状	22
1.4.1 SAR 天线抖动引起成像畸变的研究	22
1.4.2 抖动畸变的补偿算法研究	24
1.5 主要研究目标和创新点	25
1.5.1 论文研究目标	25
1.5.2 论文研究内容	25
1.5.3 论文结构安排	26
1.5.4 论文的主要创新点	27
2 第二章 SAR 基础理论和抖动建模	29
2.1 成像处理流程	29
2.1.1 雷达的脉冲收发	29
2.1.2 脉冲压缩——SAR 成像的基本原理	31
2.1.3 距离向和方位向的二维压缩	33
2.1.4 距离单元徙动和校正	35
2.1.5 成像算法简介	36
2.1.6 SAR 成像的性能指标	38
2.2 卫星系统和抖动建模	39

2.2.1	典型系统参数	39
2.2.2	成像几何模型	40
2.2.3	误差信号模型	43
2.2.4	回波信号生成系统	44
2.3	本章小结	45
3	第三章 天线指向抖动引起的 SAR 成像畸变	47
3.1	抖动畸变的误差源	47
3.1.1	距离误差可忽略的充分条件	49
3.1.2	角误差引起成像畸变的机理	53
3.2	方位向单频抖动与畸变的量化关系	54
3.2.1	点目标成像的公式推导	55
3.2.2	高低频抖动的划分	57
3.2.3	抖动频率与畸变位置	58
3.2.4	抖动幅角与畸变幅度	59
3.2.5	抖动相位与畸变相位	62
3.3	复杂抖动模型与畸变的关系	63
3.3.1	单频抖动角平面的旋转	63
3.3.2	三维抖动模型的成像畸变	68
3.3.3	多频率抖动的畸变分析	69
3.4	低频抖动的畸变特征	71
3.5	系统抖动容限	74
3.5.1	高频抖动容限	75
3.5.2	低频抖动容限	77
3.6	本章小结	78
4	第四章 邻近点成像干扰及其时变性	81
4.1	微观特征——邻近点干扰现象	82
4.1.1	时变效应	82
4.1.2	干扰幅度	84
4.1.3	干扰区间	84
4.2	宏观特征——区域成像中的明暗条带	85
4.3	包含邻近点干扰的成像建模及条纹成因解释	86

4.4	单频抖动中抖动参数与区域成像畸变	88
4.5	本章小结	90
5	第五章 高频抖动的补偿方案设计	91
5.1	抖动补偿的输入	91
5.1.1	抖动数据源	91
5.2	高频补偿算法的基本原理	92
5.2.1	补偿后的残余邻近点干扰	94
5.3	算法实现	97
5.3.1	补偿域的选择	97
5.3.2	补偿与成像处理的次序	100
5.3.3	执行效率的进一步优化	101
5.4	性能分析	103
5.4.1	点目标补偿性能	103
5.4.2	邻近点干扰抑制的性能对照	107
5.4.3	区域成像的补偿对比	109
5.5	姿态数据误差和补偿性能	112
5.6	补偿后的抖动阈值	114
5.7	本章小结	116
6	第六章 低频抖动的运动补偿方案设计	117
6.1	低频抖动补偿的基本原理	117
6.2	仅包含低频抖动的成像补偿算法	120
6.2.1	算法实现	120
6.2.2	处理窗口的优化	122
6.3	混合频率抖动的成像补偿算法	123
6.3.1	算法实现	124
6.3.2	仿真举例	124
6.4	补偿后的抖动阈值	126
6.5	本章小结	127
7	第七章 总结和展望	129
7.1	总结	129
7.2	研究展望	129

参考文献	131
攻读博士期间发表论文目录	140
作者简历	141

第一章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率微波遥感成像系统，它利用合成孔径原理和脉冲压缩技术，实现对观测目标的识别和成像，具有全天时、全天候工作的特点^{[1][2][3]}。

军事应用方面，SAR 系统可以有效监测敌方纵深军情，勘察战场环境和地形地物，探测海上军舰、舰队等大型军事目标以及大批军事调动^[4]，还可以对敏感和高危动目标进行检测、定位、跟踪，提高目标危险性评估的准确性，并可以导引对危险目标进行精确打击。民用方面，SAR 系统可用于农业农作物估产，土壤湿度检测，森林植被覆盖调查，水文、地质、洪水和海冰监测，海上舰船搜救，海洋浮油探测^{[5][6]}，地震检测及损失评估，地形高度测绘，地球变化检测(如陆地沉降、冰川运动和火山活动)等等^{[7][8]}。

轻型敏捷 SAR 卫星使用轻型敏捷卫星平台搭载雷达成像载荷，是一种新型的小卫星系统设计方案。轻敏卫星使用平台姿态机动，实现雷达波束的快速切换，兼具性能优势和成本优势，具有广阔的发展前景^[9]。当前轻敏 SAR 系统发展的一个重要瓶颈在于波束指向不稳定的隐患、以及由此带来的成像质量下降。本文从合成孔径雷达信号处理的角度入手，解释并评价波束抖动对成像质量的影响；并抖动补偿算法设计，提高轻敏 SAR 卫星的成像质量。

1.2 轻型敏捷 SAR 是小卫星空间遥感的重要发展方向

轻型敏捷 SAR 卫星是近年来出现的一种新型遥感系统，是敏捷平台技术和 SAR 载荷轻量化技术发展的产物。轻敏 SAR 系统将雷达载荷固定在卫星平台上，依靠卫星整体的俯仰、横滚、偏航三个轴向摆动实现雷达天线指向切换，具有灵活的探测能力^{[11][12]}。

1.2.1 轻敏 SAR 卫星的发展现状

发射于 2008 年的 TecSAR 是当今最典型的一颗轻敏 SAR 卫星，该卫星重量仅有 300kg，天线固定安装在卫星平台上，依靠平台的三维快速姿态机动能力实现多角度观测和多种工作模式切换。

TecSAR 是以色列国防部的雷达卫星，于 2008 年 1 月发射升空。星体重量约 300kg，干质量为 260 kg，有效载荷只有 100 kg，最优分辨率可达 0.7 m (聚束模式)，条带模式分辨率为 3 m，卫星设计寿命 5 年^[21]。卫星有效载荷的前身是机载型 X 波段多模式雷达，经过改良后将其搭载至卫星平台上^[22]。

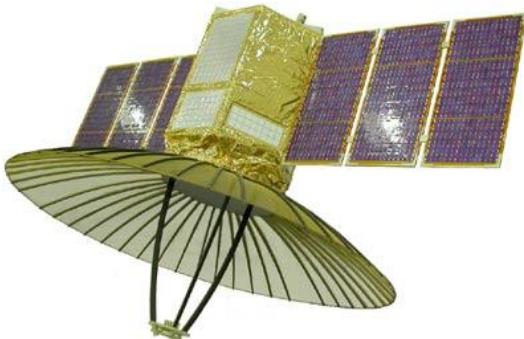


图 1-1 TecSAR 星体结构示意图

TecSAR 卫星质量轻，转动惯性矩小，能提供良好的指向切换敏捷性^[23]。这使得卫星能最大限度地利用典型情况下 8.5 min 的过顶时间，并能够以多种观测模式实现高分辨率、大面积地面覆盖^{[24][25]}。

1.2.2 敏捷平台能够增强 SAR 的遥感性能

敏捷对地观测卫星(agile earth observation satellite, AEOS)是当前的研究热点，依靠卫星平台的快速机动，这些卫星能够在较短时间内实现姿态大角度快速机动，当前典型敏捷卫星的姿态角速度可达 1/s 以上。

典型的敏捷卫星包括美国最早的伊克诺斯 (Ikonos)^{[13][14]}及其之后的快鸟 (Quick Bird)^[15]、地球眼 1 号 (Geo Eye-1)、世界观测 1 号 (World View-1) 和 2 号 (World View-2) 等，另外法国的昴宿星 (Pleiades)^{[16][17]}和印度的制图卫星 2 号 (Cartosat-2)^[18]也同样具备一定的姿态敏捷机动控制能力。

相比非敏捷卫星，敏捷卫星对地观测的主要优势如下：

- ◆ 观测时间点和观测次序可灵活设置，可以在观测窗口内任意选择观测

- 时间和观测次序以避免任务冲突，拍摄更多的观测任务，大大增强了其完成任务的能力；
- ◆ 利用卫星平台的俯仰能力，在一次过顶中可以对目标进行多个角度的观测，方便合成目标的立体图像；
 - ◆ 在一次过顶中完成一个区域目标的多个观测条带的观测成像，完成任务的时效性有了大幅提高。

而对于轻敏 SAR 卫星来说，由于敏捷平台提供的波束指向快速改变的能力，系统的遥感性能的增强还体现在以下两个方面：

➤ 灵活机动的成像模式

传统的条带模式，在卫星发射信号和接收回波的过程中，波束方向保持不变^[50]，成像的方位向分辨率上限是天线长度的一半。如果控制天线的波束固定地指向地面某一点，增加累计时间，可以获得更高的方位向分辨率，这种成像模式被称为聚束模式^[52]。与之相反，如果执行距离向的波束扫描，以降低分辨率为代价，获得更高的成像覆盖范围，这种模式叫做扫描模式^[53]。

敏捷卫星指向控制灵活，在三种常见模式之外，还可实现多种混合观测模式^[54]。Mosaic 模式^[55]第一次在 TecSAR 卫星中实现的：在距离向上，该模式与扫描模式类似，通过波束在距离向不同子测绘带之间循环切换；在方位向上，则与聚束模式类似，通过波束正向扫描，减缓了波束地面足迹的移动速度，使地面对象被照射时间加长^{[56][57]}。除此之外，轻敏 SAR 卫星还可以完成滑动聚束等成像模式。

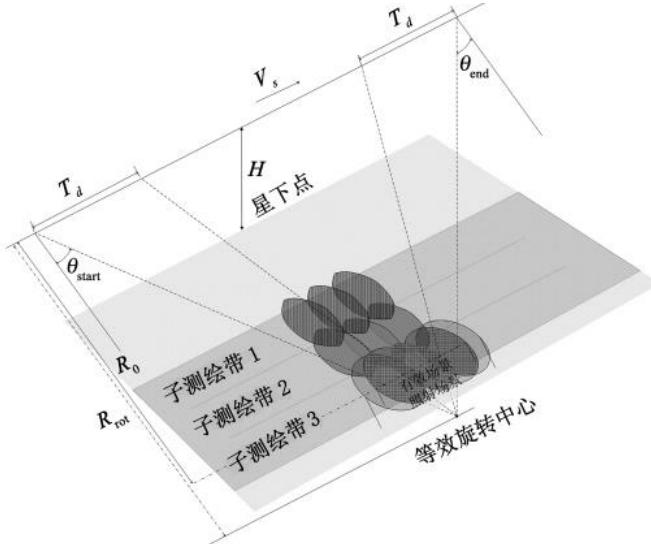


图 1-2 Mosaic 模式原理示意图

➤ 成像性能的提升

在成像过程中，通过敏捷平台提供的姿态机动能力，成像系统可以实现偏航和俯仰导引，可降低成像的多普勒中心幅度，提高聚焦效果。

1.2.3 轻敏 SAR 卫星具有明显的成本优势

波束指向改变对 SAR 的成像效果有明显的提升，当今的 SAR 卫星大多使用了波束指向可变的方式，方案主要有两种，一种是类似 TecSAR 的敏捷平台模式，一种是使用相控阵天线的电子扫描模式。重量是两者之间最大的区别：

表格 1 90 年代以来的部分卫星系统及其卫星重量对比

SAR 卫星系统	所属国家	发射时间	重量	备注
TecSAR	以色列	2008	300kg	
SAR-Lupe	德国	2006-2008	770kg	5 卫星星座
TerraSAR/ TanDEM SAR	德国	2007, 2010	1023kg	三维测地能力
COSMO-Skymed	意大利	2006-2008	1700kg	4 卫星星座
Radarsat 1, 2	加拿大	1995/2007	2750/2280kg	商用卫星
ALOS	日本	2006	3640kg	

Lacrosse	美国	1988-2005	14515kg	
----------	----	-----------	---------	--

如表格 1 所示, TecSAR 卫星的重量明显低于其他卫星, 一个重要原因在于天线的轻量化设计^[45]。为实现波束指向的二维扫描, 其他多数卫星均使用平板相控阵天线实现二维电扫描。而 TecSAR 则使用轻量的抛物面天线固定安装在卫星星体上, 依靠平台实现机械扫描。

Radarsat-2 的有源相控阵天线重量达到了 750kg, ALOS 天线重量 500kg, 而 TecSAR 卫星的展开式碳纤维反射面天线的总体重量也只有几十公斤^{[21][47]}。

另外, 小卫星的研制和发射成本较低, 系统投资少, 结构简单、设计研发周期短、制造要求条件和风险水平相对较低, 从而可以采用标准化星体和模块化设计, 这进一步降低了卫星的研发和制造成本^[48]。

由于具有重量低、体积小等特点, 轻敏 SAR 卫星在发射成本方面有明显的优势, 既可利用大型卫星发射火箭的剩余能力进行搭载发射, 也可一箭多星发射或用廉价运载火箭发射, 从而节约发射费用。TecSAR 及其后续卫星可用廉价的“人牛怪”(Minotaur) 或猎鹰-1(Falcon-1) 火箭单独发射, 或采用一箭多星的发射方式使用 EELV 火箭发射^[27]。

由于轻敏 SAR 的成本优势, 现在已经称为快速响应卫星的重要方向。快速响应空间系统(Operationally Responsive Space, ORS)^{[63][64][65]}系统的特点是以较低的成本实现对突发事件的应急反应^[66], 通常使用小型运载器发射成本低廉、性能良好、应用灵活的小卫星。^[67]快速响应星载 SAR 的设计需要是用较短的时间和较小的成本完成任务需求, 因此往往不偏重于高指标高性能。

卫星的研制成本与有效载荷设计方案有直接的关系, 对一颗快速响应卫星来说, 采用 TecSAR 可展开伞状抛物反射面方案就更具有成本优势。另外, 类似 TecSAR 这样的小卫星, 可在 30 天内发射升空, 作战响应效率比大型卫星高很多。

美国诺格航天技术公司(NGST)选择 TecSAR 卫星供美国未来的“作战快速响应太空”计划使用, 并对卫星进行改造, 升级后的卫星被称为“特立尼达”(Trinidad)^[26]。改造后的系统把包括保密通信在内的任务保障能力纳入卫星当中, 可以与小型移动式地面系统配套使用。

1.3 波束指向不稳定是轻敏 SAR 发展的瓶颈

随着卫星平台控制技术、星载遥感载荷观测精度的提高，卫星微振动越来越成为研究的重点。对轻敏 SAR 卫星，天线固定连接在卫星平台上，平台微震动会引起波束指向的抖动，导致回波畸变和成像畸变。本文对现有卫星的微振动现状进行了调研，调研结果作为抖动分析研究的输入条件。同时对卫星微震动的测量现状进行了调研，测量结果将作为抖动补偿系统的输入。

1.3.1 卫星微振动现象

因为卫星微震动导致遥感系统成像质量下降的情况非常多，如日本的 ALOS 卫星就曾受到卫星微振动的影响^[71]。2006 年发射的高分辨率对地观测卫星 ALOS 卫星带有长 22m 的太阳帆板，热引起的帆板偏离质心的运动量可达 10cm，是卫星在轨飞行时影响姿态稳定和控制精度的最大扰动源。除此之外，类似的情况还发生在 1990 年的“哈勃”望远镜^[73]，日美合作 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) 卫星和中国的资源-3 号，高分一号等卫星，这些成像系统都曾经受到卫星平台微震颤的影响，导致成像结果恶化。^{[77][78][79][80]}。

2001 年，日本国家空间发展署 (National Space Development Agency, NASDA) 利用试验卫星 ETSGVI 进行了卫星振动测量试验，卫星平台角振动在 0.39Hz 到 250Hz 范围内的径向均方根为 16.3×10^{-6} rad，其中 83.6% 的振动能量集中在 0.39~10Hz 之间，99% 以上的能量在 102Hz 以下。2015 年，武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室利用多光谱配准技术，确定资源三号卫星存在频率约 0.6Hz，垂直轨道方向约 0.35 个像素，平行轨道方向约 0.15 个像素的周期性震颤。

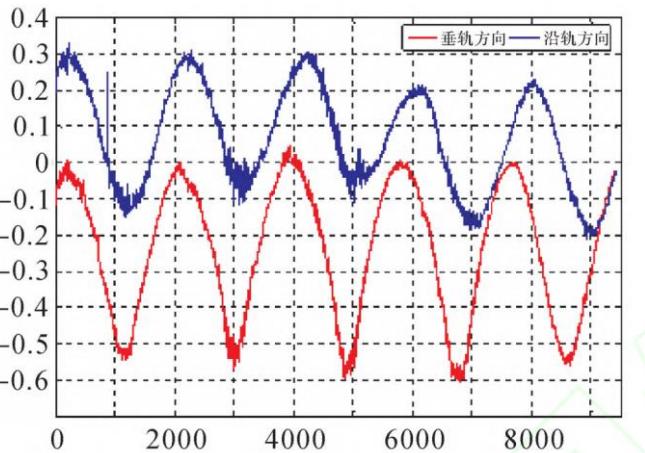


图 1-3 资源三号卫星图像的多光谱配准误差曲线

卫星微震颤的来源主要有两方面，一是来自外界环境的冲击响，二是源于卫星内部的干扰源。星体内部的抖动源包括：动量轮/反作用轮工作时产生的扰动，垂直探测仪和扫描辐射计的运动部件的转动或平动等。NASA 于 20 世纪 80 年代对 HST 的反作用轮扰动进行深入研究^[74]。1990 年 Eyerman 和 Shea 对高精度航天器微振动力学环境进行了全面总结，认为影响最大的扰动源是反作用轮组^[75]。

1.3.2 轻敏 SAR 卫星有更大的振动隐患

与传统的 SAR 卫星相比，轻敏 SAR 卫星的最大工程障碍之一在于波束指向稳定度的保持。上海微小卫星工程中心在轻敏 SAR 卫星系统预研工作中发现，在轻敏 SAR 的成像过程中，很难达到传统 SAR 卫星的稳定度指标，可能会影响成像质量。

轻敏 SAR 卫星波束稳定指向的实现难度大，部分原因是与卫星结构以及特殊的姿控系统设计有关。类似 TecSAR 的轻敏 SAR 卫星为了降低卫星的重量，必须选择使用大面积的柔性空间结构，比如直径超过三米的抛物面天线、或是长度更大的太阳帆板^[70]等。在姿态机动过程中，这些柔性附件都很可能会对卫星整体的姿控精度造成影响，增加姿控任务中的不确定性。而且，现在没有成熟的小型轻量化天线伺服系统，能在平台发生振动的情况下，保证波束指向的稳定。

除此之外，轻敏 SAR 卫星运行模式中所包含了大量的姿态机动过程，也进一步恶化了波束指向不稳定的状况：

- 在非成像时段，卫星可能处于帆板对日定向状态，或是星载数传天线对地定向状态。当接收到成像指令后，卫星需要快速调姿指向特定的成像

角度，卫星姿态切换的时间与卫星的应急反应性能直接相关，因此希望姿态切换时间尽可能短。

- 成像中姿控：在聚束、扫描等模式中需要进行持续的姿态机动，即使在最简单的条带模式中，也需要通过卫星的姿态变化执行偏航导引和俯仰导引，以降低多普勒中心值的幅度。
- 在复杂观测任务中，观测任务之间可能距离非常接近，只有能够在非常短的时间内完成调姿和姿态稳定，才可能实现高质量的成像。

大量而频繁的卫星姿态机动会导致波束指向不稳定风险的加剧，一方面，星内反作用轮等姿态执行机构的频繁工作，可能会引起卫星主体的抖动。另一方面，挠性小卫星快速姿态机动之后的姿态稳定和波束保持实现难度大^{[83][84][85]}，快速机动之后有概率残留没有得到抑制的星体抖动。如果成像时效要求高，机动窗口短，则成像中天线波束指向不稳定的概率还会继续增加。

1.4 波束指向抖动影响及补偿的研究现状

合成孔径雷达(SAR) 通过宽频带信号的脉冲压缩实现距离向高分辨，通过雷达运动构成横向长阵列以及回波脉冲的相干积累实现方位向高分辨率。几乎所有 SAR 成像算法都假设雷达沿理想轨迹运动同时保持理想波束指向，即 SAR 雷达在整个合成孔径时间内其运动的实时位置参数和姿态参数都精确已知。然而正如 SAR 领域的专家 W.G.Carrara 所说的“运动是 SAR 的依据，也是产生问题的根源”^[86]。当卫星天线存在抖动，回波信号中的相位和幅度信息都会受到影响，如果直接按照理想运动条件进行成像处理，则可能会导致输出图像的畸变。

为了避免运动误差对成像的干扰，在成像处理之前必须要对回波中的误差信息进行处理。对 SAR 系统中平台的运动误差进行补偿，以消除其对回波信号的影响，从而得到高质量图像，这个过程称为运动补偿(Motion Compensation, MoCo)。现有的文献中已经有大量关于抖动畸变和抖动补偿的研究内容。

1.4.1 SAR 天线抖动引起成像畸变的研究

天线抖动引起的运动误差包含两个方面，轨迹误差和角误差。其中轨迹误差的研究发展较早，这种误差导致目标与雷达之间的距离历程畸变，在机载 SAR 环境中轨迹误差对成像的影响非常明显；在早期的星载 SAR 抖动补偿研究中，

很多学者借鉴了机载 SAR 运动畸变的研究成果，并针对星载的系统特征重新建模和优化，取得了一定的理论成果。

上世纪 90 年代，美国航空航天公司 (Aerospace Corporation) 将比较成熟的成对回波理论(Zyomorphous paired-echoes)^[113]直接用于对抖动导致成像畸变进行建模分析。在文献[123]中，作者首次提到天线高频抖动会导致图像结果中对称的虚像，如图 1-4 所示。不过文章并没有对虚像的幅度做出有效的解释。至于文章中提到的补偿算法更适用于机载 SAR 环境中含有大量轨迹误差时候的运动补偿处理，实际仿真对星载 SAR 的抖动误差没有明显的补偿效果。

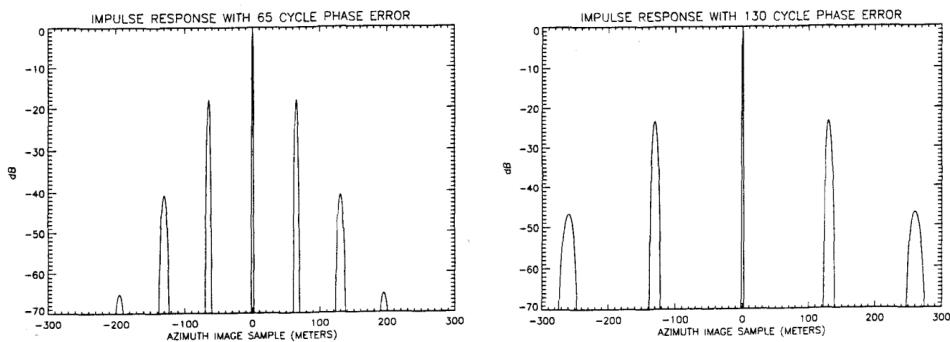


图 1-4 抖动产生虚像的间距与抖动频率成正比

相比之下对角误差的研究则发展的较晚，直到本世纪初高分辨率星载 SAR 系统开始发展，对 SAR 成像质量要求逐渐提高，角误差导致的图像损失才逐渐进入研究者的视线。

与轨迹误差的建模方法不同，在角误差影响的畸变分析中需要将天线方向图引入到抖动回波畸变模型中^{[115][116][117]}。卫星成像过程中伴随着天线指向中心线的抖动，而收发信号的强度又与目标在雷达中的视角有关，所以天线的抖动导致了回波强度的起伏，或者说方位向信号的包络畸变^{[118][119][120][121][122]}。

2001 年北京航空航天大学陈杰等学者对卫星的高频姿态抖动重新建模，在模型中加入了回波幅度，得到了畸变和抖动的量化关系。以此理论模型为基础，该研究团队在十年左右的时间内，进一步分析了多种观测模式下，因为姿态的高频抖动产生的图像误差^{[124][125][126][127][128][129][130]}。不过受到回波模型的限制，该研究成果仅能用于分析方位向或者距离向的单频抖动对成像的影响；又因为信号模型的精度限制，所得到的结论只能用于分析距离目标点最近的一对虚像的能量，如图 1-5 所示。

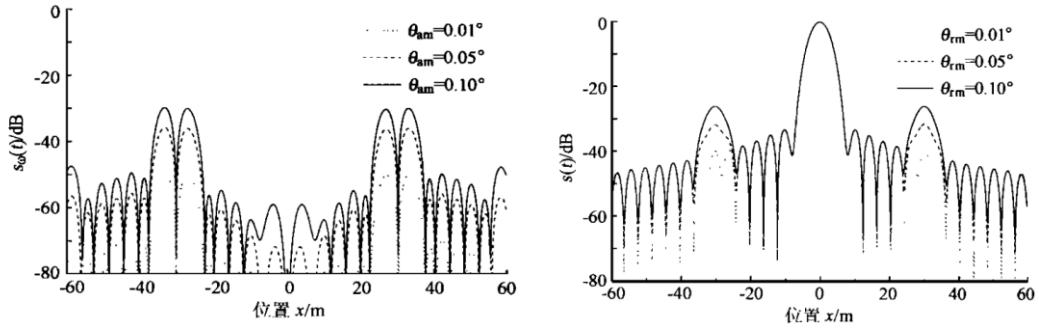


图 1-5 方位向抖动和距离向抖动的成像结果

2008 年, 意大利学者 D. Giudici 进行了指向误差的量化分析工作, 针对静态指向误差和随机抖动误差这两种星载 SAR 中最简单的误差类型^[131]。在分析中同样加入了对回波幅度的分析, 论文中对随机抖动误差的研究工作在卫星的总体设计中有着重要的意义。

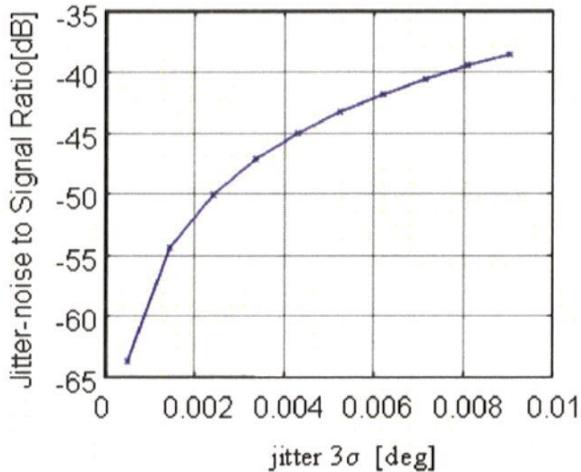


图 1-6 随机抖动误差能量和信噪比变化

1.4.2 抖动畸变的补偿算法研究

对 SAR 运动误差的补偿处理一直是 SAR 成像研究领域的热点, 自从 SAR 发展的早期就已经开始: 1973 年, J. L. Frrwel 等人研究了导航误差对 SAR 成像的影响^[87]; 1975 年, John C. Kirk, JR 通过传递函数的形式对运动补偿的要求进行了定性分析^[95], 并给出运动补偿一般流程, 这一工作初步奠定了 SAR 运动补偿的理论基础^[96]。

从上世纪 90 年代开始, SAR 运动补偿的研究进入一个新的热潮。1990 年 J. R. Moreira 提出的反射位移法(RDM)在德国 E-SAR 机载系统中成功应用^[97]。其主要

原理是在方位向选取两段连续的数据，通过比较方位谱的频率差得出多普勒调频率，从而提取天线相位中心的运动信息^[98]。另一种经典的基于回波数据误差估计方法，相位梯度自聚焦(PGA)来自美国 Sandia 实验室^{[99][100]}，该算法的独特之处在于它不基于任何先验相位误差模型，而是基于图像中某些特显点的散焦状况，并且在处理中巧妙地利用了相位误差在多个距离单元回波信号上的冗余性，并通过加权相加和迭代来提高相位误差估计的准确性。大量的实验也表明 PGA 算法具有较好的鲁棒性，经过后期很多学者的发展和改善^[101]，目前在在 SAR 成像中得到了广泛的应用^{[102][103][104][105][106]}。近十几年来发展起来的最小熵相位自聚焦方法可以实现基于回波数据的运动误差估计^{[106][107][123]}，该方法基于二维 SAR 图像熵值建立关于相位误差的最优化方程，从而得到优化求解的误差量。由于该方法基于最小熵建立估计模型，因此在回波信噪比、信杂比较低的情况下具有明显优势。其中美国 MIT 的 Kragh T.J. 经过理论推导得到单调收敛的最小熵相位自聚焦算法^[110]，并且利用代价函数改善算法运行效率，使得其在大数据量的 SAR 成像中也可以应用。

不过这些相对成熟的运动补偿算法都是针对机载环境，机载 SAR 与星载 SAR 的几何关系和误差模型区别较大，这些算法很难直接应用于星载系统。较早对机载 SAR 运动补偿算法进行修改，并用于星载 SAR 抖动补偿的是美国的 Marechal N.^[123]，他提出的 2D-PGA 算法能用于抑制抖动引起的旁瓣畸变。国内学者 Ni C 也提出了基于姿态残差校正的运动补偿算法。不过这些算法都是从相位误差的角度补偿非理想运动的影响。而针对角误差的运动补偿，现有文献中并没有系统的方法和结论。

1.5 主要研究目标和创新点

1.5.1 论文研究目标

- 1，建立适用于多种抖动模型的、高精度的抖动成像畸变理论。
- 2，在成像处理过程中进行抖动补偿，提高畸变回波信号的成像质量。

1.5.2 论文研究内容

论文内容主要分为两个部分，第一部分是畸变分析，第二部分是畸变补偿。

畸变分析部分研究抖动与成像畸变之间的量化关系，重新建立回波畸变模型，并分析了抖动产生成像畸变的原因，得到了更精确的抖动成像畸变表达式。以畸变公式为基础，对抖动的高低频率进行了理论划分，并分析了畸变产生的不同机理；推导了点目标成像中抖动参数与几个重要的图像畸变参数之间的量化关系，并通过仿真进行了验证。畸变分析从最简单的抖动模型开始，然后将结论推广到多种复杂模型中。系统的抖动容限也在这部分内容中进行了介绍。

在研究中发现成像畸变的某些宏观现象无法用上述的点目标分析来解释，于是引入了邻近点成像干扰，对区域的成像过程进行了分析。通过理论推导得到了包含邻近点干扰的成像表达式，解释了明暗条带的形成机制，并分析了畸变规律。

畸变补偿方面的研究内容分高频低频两部分叙述。以包络畸变校正为基础，本文提出了高频抖动的补偿方法，并对算法的执行效率和算法性能进行了优化。算法性能通过对点目标成像，邻近点干扰和区域补偿等多个方面进行了分析。算法的补偿性能会受到指向角误差的影响，影响程度通过仿真进行了分析。最后对补偿后的抖动阈值进行了分析，相比无补偿情况有了明显的提高。

以动态多普勒调整为基础，本文提出了低频抖动的补偿方法，该方法可以有效提高回波脉冲的能量利用率，提高成像结果的信噪比。低频抖动补偿的实施方案分为两种，如果抖动中仅包含低频，则抖动补偿包含多普勒中心调整和幅度校正两个部分。如果是抖动中包含高频分量，则用包络校正代替幅度校正。算法在能量利用率、区域补偿等方面的性能都通过仿真进行了分析。

1.5.3 论文结构安排

第二章介绍 SAR 信号处理的基本知识和流程，对系统和信号进行建模；

第三章分析抖动影响，推导点目标成像公式。分析抖动成因，总结畸变规律，对建立抖动与畸变的量化关系；

第四章处理抖动影响中的邻近点干扰问题。建立包含邻近点干扰的成像公式并分析畸变规律；

第五章建立并优化高频抖动的补偿算法，并分析补偿性能；

第六章建立并优化低频抖动的补偿算法，并分析补偿性能；

第七章总结全文，展望下一步的研究方向。

1.5.4 论文的主要创新点

本论文以抖动畸变研究为基础，提出一种适用于轻型敏捷 SAR 卫星的成像补偿算法，能够有效提高抖动中收集到的雷达回波的成像质量。论文的主要创新点如下：

1，本文提出一种天线抖动参数与点目标成像畸变参数之间定量关系的通用理论分析模型。该模型解释了抖动频率、幅度、相位、方向等参数对成像畸变的影响，既适用于单频平面抖动，也适用于多频三维抖动；与之相比，传统的畸变理论模型仅分析了固定方向的平面单频抖动中幅度和频率与成像畸变的关系。经过仿真测试，新模型的量化精度有大幅度的提高。

2，本文首次提出高频抖动会导致区域成像中的明暗条带现象，并通过成像推导中加入邻近点干扰效应解释了这种现象产生的原因，建立了畸变与抖动参数之间的定量关系。邻近点干扰效应的提出弥补点目标分析无法描述抖动畸变时变效应的缺陷，对抖动补偿算法设计也有一定的指导意义。

3，本文提出一种基于包络畸变校正的高频抖动算法 MoCo-AEMC，能够将旁瓣干扰抑制在较低的水平，并能够有效降低邻近点干扰效应。算法的性能通过仿真验证，比现有补偿算法有明显的性能提升。分析发现，抖动补偿的引入能提高系统对高频抖动的容忍阈值。

4，本文提出一种基于多普勒中心动态调整的低频补偿算法 MoCo-AADC，该补偿算法可以优化回波脉冲能量的利用率提高成像结果的信噪比。对不含高频抖动的情况，通过多普勒中心调整和幅度校正两步进行畸变补偿；对同时含有高频抖动的情况，则通过多普勒中心调整和包络校正两个步骤进行畸变补偿。算法的性能通过了仿真验证。

第二章 SAR 基础理论和抖动建模

合成孔径雷达卫星在工作过程中发射并接收脉冲，然后将收集的回波信号发送到地面进行处理。地面收到的回波信号经过二维聚焦之后，输出最终的 SAR 图像。如果存在天线的指向抖动，成像点和雷达之间的距离和夹角都会因此变化，从而造成回波信号的相位和幅度误差。两种误差在图像处理过程之中，以不同的形式传递并导致成像畸变。

本章首先叙述了 SAR 成像的处理过程，然后对抖动的影响从几何和信号两个角度进行建模。这两部分是本文理论分析的基础。

2.1 成像处理流程

卫星接收到回波信号经初步处理后传回地面站，然后在地面完成后续的成像处理过程，得到最终的 SAR 图像。成像区域内的任意一个点目标被数千个脉冲波束照射，脉冲回波包含该点回波信息的信号又被采样成数千个数据点。每个点的回波信息存储在超过百万的数据点，而每个数据点中的信息实际上又是大量点目标回波信息的叠加。如何将这些弥散的回波信息集中在一个像素单元内是成像算法需要解决的基本问题。

SAR 成像处理的过程可以看作是将数百万个数据点中的回波能量聚焦到一个分辨率单元内，同时实现距离向和方位向的高分辨率成像，回波信息的聚焦是通过脉冲压缩的方法实现的。为了高效地实现脉冲压缩的处理，在成像操作中还需要辅助距离徙动校正等一系列的操作^[133]。实现脉冲压缩和距离徙动校正有多种不同的方法，本节也做了简要的阐述。

2.1.1 雷达的脉冲收发

雷达发射脉冲通常是具有线性调频特性的脉冲，信号表达式可以写为：

$$s_{pul}(\tau) = \omega_r(\tau) \cos\{2\pi f_0 \tau + \pi K_r \tau^2\} \quad (1)$$

式中的 τ 是脉冲内相对时间，在合成孔径雷达系统中也称为快时间或者距离向时间，与脉冲序列 η (慢时间、方位向时间) 相对应，通常把回波信号和图像看

作是这两个时间的二维函数。另外， f_0 是载波频率， K_r 是频率随时间的变化速率，也成为线调频率。

脉冲发射到地面，经过反射之后被雷达接收，回波信号中包含照射区域的距离信息和反射率信息，可以看作是脉冲波形和照射区域内地面反射系数的卷积：

$$s_r(\tau) = g_r(\tau) \otimes s_{pul}(\tau) + n(\tau) \quad (2)$$

式中 $g_r(\tau)$ 包括了距离信息和点目标的反射率信息； $n(\tau)$ 为实际系统中存在的附加噪声，主要来源于接收电子器件的前端，可以用高斯白噪声来建模。等式(2)的含义是，对于地面点目标来说，SAR 成像系统是一个线性时不变系统，因此可以用冲击响应来考察系统性能。也就是说，一个点目标的成像结果，即可以表征 SAR 系统的多方面性能。

假设回波区域内有单一的点目标，与雷达相位中心相距 R_a ，反射系数与传输损失等用一个常量 A'_0 表示。这个单一点目标回波表达式可以写为：

$$\begin{aligned} s_r(\tau) &= A'_0 s_{pul}(\tau - 2R_a/c) \\ &= A'_0 \omega_r(\tau - 2R_a/c) \times \cos \left\{ 2\pi f_0 \left(\tau - 2 \frac{R_a}{c} \right) + \pi K_r (\tau - 2R_a/c)^2 + \psi \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\omega_r(\cdot)$ 是脉冲信号的包络， ψ 表示地表散射过程可能引起的雷达信号的相位改变。对于特定的反射体，一般认为在雷达照射期间，这个相位改变是常数。

等式(3)是单个脉冲的表达式，在对点目标的照射过程中，星上的 SAR 系统可以收集到上千个脉冲回波，包含点目标的距离和反射率信息。因为距离是随着慢时间变化的，这里将 R_a 写成 $R(\eta)$ ，这里的 η 就是前面提到的慢时间变量。点目标的全部接收信号可以用一个表达式给出：

$$\begin{aligned} s_r(\tau, \eta) &= A'_0 \omega_r(\tau - 2R(\eta)/c) \omega_a(\eta - \eta_c) \\ &\quad \times \cos \left\{ 2\pi f_0 (\tau - 2R(\eta)/c) + \pi K_r (\tau - 2R(\eta)/c)^2 + \psi \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\omega_a(\cdot)$ 是方位向包络，表征脉冲强度随着脉冲序列的变化历程， η_c 是多普勒中心频率，用来表征天线中心线的方位向斜视程度。接收到的回波首先经过正交解调，去除其中的雷达载频下变频为一个基带信号。对点目标的回波基带信号仿真幅度和相位如图 2-1 所示。

$$s_0(\tau, \eta) = A_0 \omega_r (\tau - 2R(\eta)/c) \omega_a (\eta - \eta_c) \\ \times \exp \left\{ j\pi K_r (\tau - 2R(\eta)/c)^2 \right\} \exp \left\{ -j4\pi f_0 R(\eta)/c \right\} \quad (5)$$

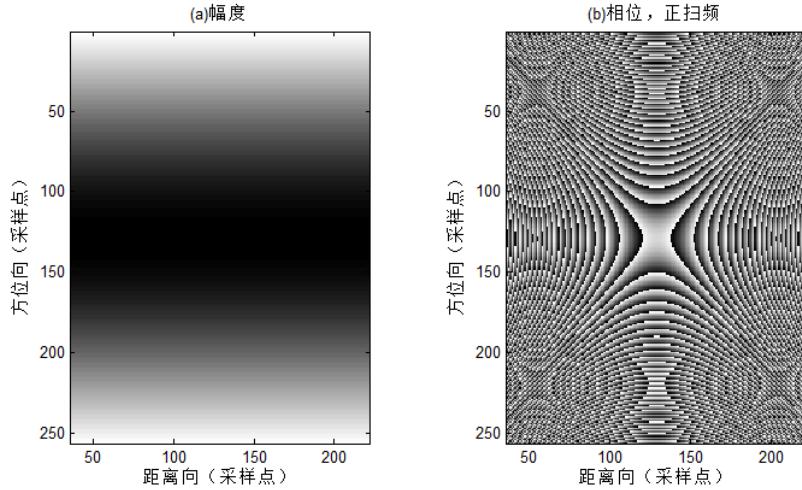


图 2-1 点目标回波信号的时域特征 (零斜视)

单点的回波信号是弥散的，需要通过回波处理将其聚焦，能量聚焦和高分辨率获得的基础是线性调频信号的脉冲压缩过程。

2.1.2 脉冲压缩——SAR 成像的基本原理

雷达系统通过脉冲能量对远场目标的距离、反射率等参数进行测量，为了保证测量结果的有效性，接收脉冲必须具有足够强的能量和足够好的分辨率。为了得到良好的分辨率，要求脉冲尽可能短；而为了得到精确的目标参数，接收信号的信噪比必须足够高。在发射功率受限的前提下，高分辨率与高信噪比是相互矛盾的。

在 SAR 系统中，为了同时达到高分辨率和高信噪比，系统发射一个信号长度远长于分辨率的脉冲，然后在回波信号的处理过程中，利用发射脉冲的复制信号对回波脉冲进行压缩，最终得到所需的分辨率。这种方法称为脉冲压缩，是雷达系统中最常见的技术之一，它与通信系统中的展布频谱在原理上非常相似。脉冲压缩是为了获得高分辨率的接收数据，从而得到聚焦良好的图像，而通信中的展布频谱则是为了在噪声环境中发送消息。

脉冲压缩过程的表达式如下：如果 $s_r(t)$ 为接收信号， $g(t)$ 为复制信号，

脉冲压缩滤波器 $h(t)$ 是复制信号时间反褶后的复共轭 $h(t) = g^*(-t)$ ，脉冲压缩的输出结果可以写成：

$$\begin{aligned}s_{out}(t) &= s_r(t) \otimes h(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s_r(u) h(t-u) du\end{aligned}\quad (6)$$

等式(6)需要在频域进行分析，但是由于积分项中具有二次相位，无法通过传统积分方式得到解析解，在推导其脉冲压缩表达式之前，需要首先引入驻定相位原理。驻定相位原理 (Principle of Stationary Phase, POSP) 可以给出满足某些条件下的高次相位积分式的近似解。在 SAR 信号系统中，驻定相位原理的理论分析结果具有非常高的近似精度。

驻定相位原理

假设 $g(t)$ 是一个调频信号，其调制可以是线性的（距离向相位），也可以是近似线性的（方位向相位）：

$$g(t) = \omega(t) \exp\{j\phi(t)\} \quad (7)$$

式中的其中 $\omega(t)$ 是实包络， $\phi(t)$ 为信号调制相位。信号的频谱，也就是 $g(t)$ 的傅立叶变换表达式为：

$$\begin{aligned}G(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp\{-j2\pi ft\} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) \exp\{j\phi(t) - j2\pi ft\} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t) \exp\{j\theta(t)\} dt\end{aligned}\quad (8)$$

式中的单一相位项为： $\theta(t) = \phi(t) - 2\pi ft$ ，积分相位中包含二次项或者更高项。

POSP 的基本原理是，如果包络函数相对于相位函数变化很慢，那么在相位 $\theta(t)$ 变化很快的地方，包络 $\omega(t)$ 在一个完整的相位周期内近似为常数。由于这一区间内相位周期的正负部分相互抵消，故其对积分的贡献（包括实部和虚部）几乎为零，对积分起到主要作用的部分集中在相位驻定点附近。

SAR 系统恰好能满足包络缓变的要求，应用驻定相位原理的简化之后，可以得到信号的近似频谱表达式：

$$G(f) = C_W(f) \exp\{j(\Theta(f) \pm \pi/4)\} \quad (9)$$

- 式中, C_1 是一个常数, 通常可以忽略, 相位中 $\pi/4$ 的符号由 $\phi''(t_s)$ 给出, 通常也可以忽略。
- $W(f)$ 是频域包络, $W(f) = \omega[t(f)]$, 是时域包络的尺度变换。
- $\Theta(f)$ 为频域相位, $\Theta(f) = \theta[t(f)]$, 是时域相位的尺度变换。

上面式中的 $t(f)$ 由信号的时频关系给出, 这一关系可以由驻留点 (导数为 0) 处完整被积相位的导数给出: $d\theta(t)/dt = 0$ 。

使用驻定相位原理推导线调频信号的压缩过程, 得到的输出是一个近似为 sinc 的函数。也就是, 当输入信号为:

$$s_r(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T}\right) \exp\left\{j\pi K(t-t_0)^2\right\} \quad (10)$$

脉冲压缩滤波器的表达式可以写成:

$$h(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left\{-j\pi K(-t)^2\right\} \quad (11)$$

输出信号近似为:

$$s_{out}(t) \approx T \text{sinc}(KT(t-t_0)) \quad (12)$$

以上等式除了需要满足包络缓变的前提之外, 还需要 chirp 信号有足够高的时间带宽积 (TBP, Time Bandwidth Product)。只有这两个条件同时满足, 理论结果才是精确的。

2.1.3 距离向和方位向的二维压缩

下面就看一下 SAR 系统是如何利用脉冲压缩原理获得距离和方位向的高分辨率。距离分辨率的获得相对简单, 利用上一节中所述的脉冲压缩原理, 对具有线调频特性的距离向信号进行聚焦即可。对等式(5)进行距离向脉冲压缩之后, 得到的输出信号为:

$$\begin{aligned} s_{rc}(\tau, \eta) &= \text{IFFT}\{S_0(f_\tau, \eta)H(f_\tau)\} \\ &= A_0 p_r[\tau - 2R(\eta)/c] \omega_a(\eta - \eta_c) \exp\{-j4\pi f_0 R(\eta)/c\} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, 压缩脉冲包络 $p_r(\tau)$ 是窗函数 $W_\tau(f_\tau)$ 的傅立叶逆变换。对于矩形窗,

$p_r(\tau)$ 是 sinc 函数，对于锐化窗， $p_r(\tau)$ 是旁瓣较低的 sinc 函数。经过距离压缩处理之后，斜距分辨率为：

$$\rho_r = \frac{c}{2} \frac{0.886\gamma_{w,r}}{|K_r|T_r} \quad (14)$$

式中 $\gamma_{w,r}$ 为锐化窗引入的 IRW 展宽因子， T_r 是发射脉冲的长度，所以 $|K_r|T_r$ 是 chirp 信号的带宽。也就是说，斜距分辨率与发射信号的带宽成反比。压缩之后的图像如图 2-2 所示，与压缩之前的图像相比，能量在距离向被聚焦。

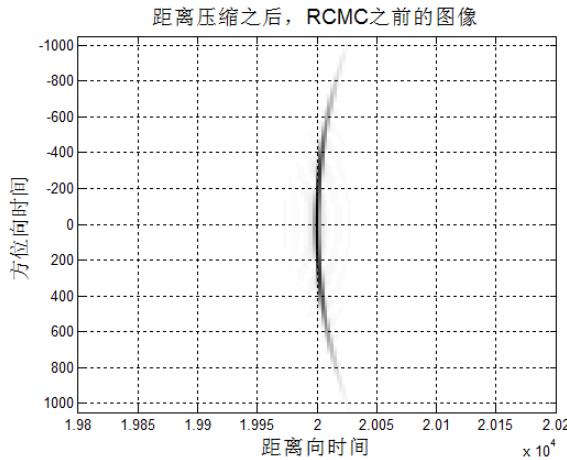


图 2-2 距离向压缩之后的点目标图像

方位向信号也具有近似的线调频特性，这里频率的线性变化特征是由距离随方位时间的变化导致的。距离关于慢时间是一个双曲线函数，这里为了分析方便，可以将其近似为抛物线，如公式(15)所示。在低斜视，孔径较小的时候这种近似带来的误差很小。

$$R(\eta) = \sqrt{R_0^2 + V_r^2 \eta^2} \approx R_0 + \frac{V_r^2 \eta^2}{2R_0} \quad (15)$$

式中的 R_0 代表最小斜距， V_r 是矩形等效几何模型中的卫星前进速度。将近似表达式(15)带入(13)中，得到距离压缩信号为：

$$s_{rc}(\tau, \eta) \approx A_0 p_r \left(\tau - 2 \frac{R(\eta)}{c} \right) \omega_a(\eta - \eta_c) \times \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 R_0}{c} \right\} \exp \left\{ -j \pi \frac{2V_r^2}{\lambda R_0} \eta^2 \right\} \quad (16)$$

式中的第二个指数项就是信号的方位向调制，由于相位是 η^2 的函数，故信号具有线调频特性，调频率为： $K_a = 2V_r^2 / \lambda R_0$ 。事实上，在进行方位向脉冲压缩之前，还需要进行距离徙动校正等一系列处理，处理过程将在下一节中介绍。假设距离徙动校正精确，输出信号在距离多普勒域的表达式为：

$$\begin{aligned} S_2(\tau, f_\eta) &= A_0 p_r \left(\tau - \frac{2R_0}{c} \right) W_a(f_\eta - f_{\eta_c}) \\ &\times \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 R_0}{c} \right\} \exp \left\{ j\pi \frac{f_\eta^2}{K_a} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

式中 $W_a(\cdot)$ 是多普勒域的包络函数， f_η 是方位向频率。

方位向匹配滤波器需要根据距离等式来设计，在低斜视小孔径的时候，可以写成： $H_{az}(f_\eta) = \exp \left\{ -j\pi \frac{f_\eta^2}{K_a} \right\}$ 。经过压缩和 IFFT 即可得到最终的成像结果：

$$\begin{aligned} s_{ac}(\tau, \eta) &= A_0 p_r (\tau - 2R_0/c) p_a(\eta) \\ &\times \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 R_0}{c} \right\} \exp \left\{ j2\pi f_{\eta_c} \eta \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

2.1.4 距离单元徙动和校正

由于瞬时斜距 $R(\eta)$ 随着方位时间的变化而改变，是方位时间的双曲函数。这意味着在信号存储器中，照射时间内的目标轨迹会经过不同的距离单元，这种现象被称为是距离单元徙动或者 RCM (Range Cell Migration)。

斜距随慢时间变化的双曲线等式可以展开为幂级数形式，这样就出现了 RCM 的线性分量、二阶分量和更高阶分量：

$$R(\eta) = R(\eta_c) + V_r \sin \theta_{r,c} (\eta - \eta_c) + \frac{1}{2} \frac{V_r^2 \cos^2 \theta_{r,c}}{R(\eta_c)} (\eta - \eta_c)^2 + \dots \quad (19)$$

上一节图 2-2 所示的情况是正侧视，所以 RCM 的线性近似为 0，距离徙动表现为二次和高次分量，这里的 RCM 也称为距离弯曲。如果天线是大斜视指向，则 RCM 可能会以线性分量为主，如图 2-3 中左图所示。

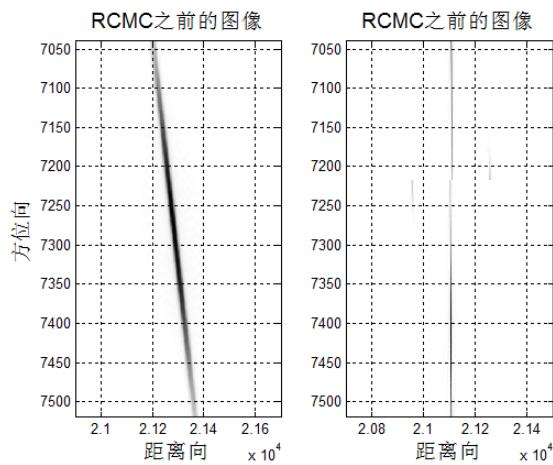


图 2-3 大斜视的 RCM 示意及校正后的图像

由于 RCM 的存在，距离向脉冲经过压缩之后回波能量分布在多个距离单元内，如果直接进行方位向匹配滤波，计算过程是一个二维匹配滤波过程，不能使用快速卷积，所以算法效率非常低。为了提高算法效率，在方位向脉冲压缩之前，往往要经过处理将曲线变成直线，使得多数的回波能量集中在一个距离单元内。这种操作就是距离徙动校正 (RCMC, Range Cell Migration Correction)，经过 RCMC 处理之后，都能够将大多数的回波能量集中到同一个距离单元内，如图 2-3 中右图所示。

RCM 是 SAR 的一个固有特征，一方面，正是距离徙动的二阶项导致了方位向的线性调频特性，使得高分辨率脉冲压缩成为可能，另一方面 RCMC 也使得信号处理变得复杂。各个算法徙动校正的实现方法不同，但往往都是成像过程中运算量最大的部分，而且校正精度对成像的精度也有非常大的影响。

2.1.5 成像算法简介

回波信号的成像过程大致分为：距离压缩，距离徙动校正和方位压缩三个过程，根据不同的实现方法，发展出了多种成像算法，比如：距离多普勒算法(Range Doppler Algorithm, RDA)，变标算法 Chirp-Scaling(CS)， ω K 算法，极坐标算法(Polar Format Algorithm, PFA)等。这些算法适用于不同的成像环境，执行脉冲压缩和徙动校正的先后次序和方法也有较大差别，有些算法还增加了一些提高精度的操作，但是总体步骤大致如图 2-4 所示。



图 2-4 SAR 成像处理的基本步骤

在众多 SAR 成像算法中，RD 算法是最常用，也是最容易理解的一种算法，因为其处理过程可视为回波接收的逆过程。距离多普勒算法(Range Doppler, RD)主要是为处理 SEASAT 数据而提出的高效处理算法，但由于其概念明确、实现方法简单，至今仍然非常常用。距离徙动校正在距离多普勒域内完成是 RD 算法区别于其它算法的最显著特征，也是称其为距离多普勒算法的原因。

距离多普勒算法的核心思想是利用方位向信号的时不变特性，在方位频域，即多普勒域内对距离位置相同而方位位置不同的一组目标一次完成距离徙动校正，在距离多普勒域内高效实现 RCMC。另外，RD 算法还能够沿距离向调整参数，补偿 RCMC 的距离空变特性。

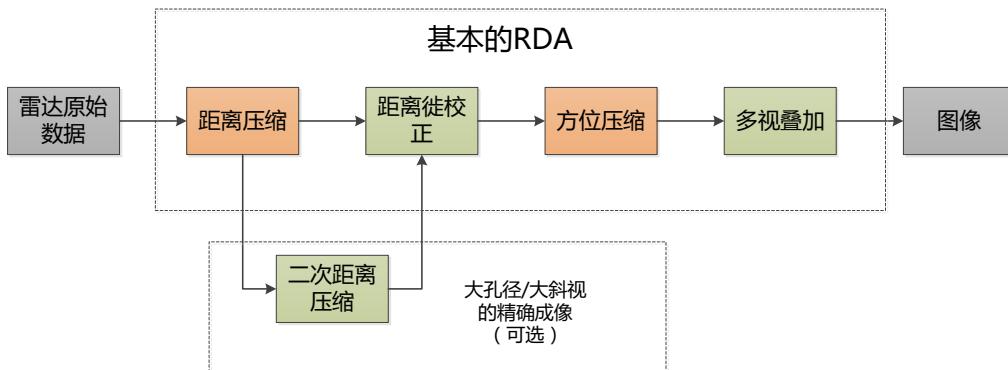


图 2-5 距离多普勒算法 (RDA) 流程图

图 2-5 中的二次距离压缩(Secondary Range Compression, SRC)是为了补偿方位/距离向的耦合。SRC 主要是为了解决这样的问题，在高分辨率或大斜视角条件下，在距离多普勒域内线性调频信号的调频率发生了变化，使用初始的线性调频斜率进行距离压缩将造成距离散焦。这种现象可解释为在高分辨率或大斜视角条件下，每一距离单元内的时间带宽积发生了变化，因此距离向相位将受到方位向 FFT 的影响。在 CS 算法中也有类似的操作。

本文大部分是针对抖动影响和抖动畸变的理论分析，只有在补偿算法的实现一节中会设计到对成像算法的讨论。在此只对成像算法做简要说明，对其他算法也不做进一步的介绍。

2.1.6 SAR 成像的性能指标

通过研究点目标成像可以分析 SAR 系统性能，因为在多数情况下，合成孔径雷达系统可以看作是一个线性时不变系统。使用冲激响应即可描述系统的性质。对星载雷达系统来说，地面的一个单一孤立散射体（如角散射器）可以看作是一个冲激输入，许多重要的 SAR 图像质量参数都可以通过测量点目标的成像结果予以估计。典型的点目标成像如图 2-6 所示，左图是某点的三维成像结果，右图是点目标成像的理想方位向切面。

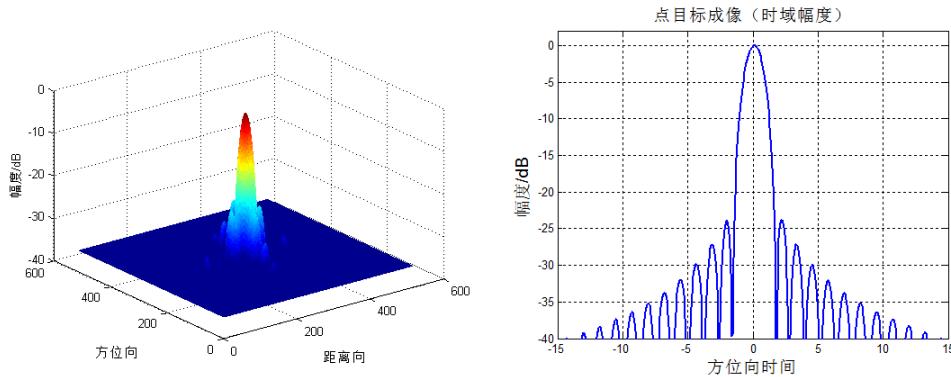


图 2-6 典型的点目标成像结果

SAR 图像是二维的，通常的性能分析仅使用沿方位向和距离向的两个垂直切面即可。典型的点目标成像的切面是一个类似 sinc 函数，理想成像是主瓣，而周围还有一些能量降低的旁瓣。

SAR 主要的图像质量参数有以下几种：

- **IRW:** 即冲激响应宽度，代表了 SAR 系统的分辨率。通常值为冲激响应波形的 3dB 宽度。理想情况下，方位向 IRW 是天线尺寸的一半（条带模式），距离向 IRW 与发射信号的带宽成反比。不过成像处理中的窗系数选择也会对冲激响应宽度产生影响。分辨率是遥感系统的最重要参数，因此 IRW 是 SAR 成像中最重要的性能参数之一。
- **PSLR:** 峰值旁瓣比，指的是最大旁瓣与主瓣的高度比，以分贝 (dB) 表示。均匀频率的傅立叶变换得到 PSLR 是-13 dB。这个数值对于 SAR 系统来说是太大的，会导致弱目标被邻近的强目标掩盖，丧失图像的细节信息。在系统中通常使用锐化窗将 PSLR 降低到-23dB 左右。
- **ISLR:** 积分旁瓣比，旁瓣能量和主瓣能量的比值，同样用 dB 来表示。这个参数与图像的信噪比有关，代表了聚焦之后有效能量与干扰能量之间

的比值。同时 ISLR 也能直接影响到图像的对比度性能

- **信号峰值强度:** 峰值点处的目标相应幅度, 对系统的抗噪声能力有一定影响。
- **相位:** 因为抖动的影响, 最终的成像包含主瓣和副瓣, 两者之间会存在周期变化的相位差, 这个参数在抖动估计中用处较大。
- **峰值位置:** 这个参数对于几何定标有重要的作用, 不过在轻敏 SAR 的成像过程中, 抖动误差对冲激峰值位置的影响非常小, 本文的分析中不需要考虑这个因素。
- **鬼影目标:** 由于方位向波束方向图延伸至主瓣之外, 因此与距离信号相比, 方位信号不是带限信号。同时, 方位采样率 PRF 的提高通常会受到诸如距离测绘带等因素的限制。这意味着方位信号分量将以模糊的形式相互混叠。由于匹配滤波器按相同的相位形式对信号的每一混叠部分进行处理, 因此混叠会使压缩后的数据中出现“鬼影目标”。不过鬼影目标幅度与雷达高度负相关, 与分辨率大小成正相关。仿真中发现, 典型情况下轻敏 SAR 卫星条带模式中的鬼影幅度小于-30dB, 所以本文中对鬼影目标的考虑较少。

以上参数中本文使用最多的是 PSLR 和 ISLR 两个旁瓣性能指标, 用以描述抖动产生的旁瓣能量大小。其次峰值幅度也会被使用, 用来描述抖动对于成像能量的影响。

2.2 卫星系统和抖动建模

2.2.1 典型系统参数

本文在建模和仿真中使用的轻敏 SAR 卫星平台参考 TecSAR 卫星设计, 卫星天线为固定在星体上的轻型抛物面天线, 通过卫星本体的三轴姿态机动改变波束的指向方向。卫星能实现左右侧视, 并可以完成扫描、条带、聚束以及混合的 Mosaic、滑动聚束等多种成像模式。卫星主要的参数如下表所示:

表格 2 轻敏 SAR 卫星模型的基本参数

卫星轨道高度	500 km
距离向分辨率	3 m

条带模式方位向分辨率	3 m
载波频率	9.65 GHz
默认侧视角度	30°
默认斜视角度	0°
方位向过采样率	1.2
距离向过采样率	1.2
卫星重心到天线 APC 距离	2 m
方位向波束视角	0.31°

卫星天线指向误差可以分成静态误差和动态抖动两个部分。其中，静态误差的分析和补偿技术在早期的 SAR 研究阶段已经非常成熟，在此不做讨论。本文假设静态的指向偏差已经得到补偿，只考虑剩余的动态误差的影响和补偿。天线指向围绕某个给定的指向角度发生空间抖动，抖动误差建模包括几何模型和信号模型两个层次。

2.2.2 成像几何模型

如图 2-7 所示是包含天线抖动的 SAR 成像的等效矩形模型。图中卫星以等效速度 v_r 沿 x 轴正方向前进，卫星重心的方位向坐标 $X(\eta)$ 。除此之外，图中 r_s 代表卫星重心到天线波束中心的距离， R_0 代表 APC 到目标的最近距离，在理想情况下，天线相位中心 (APC) 到目标点 (Target) 的距离为 $R_i(\eta)$ ，不过因为天线指向误差的存在，天线相位中心的实际位置为 APC' ，因此产生了距离误差 $R_{jitter}(\eta)$ 。理想天线指向向量和实际天线指向向量两者的方向不同，之间的差距我们定义为角误差 $\theta_{jitter}(\eta)$ ，角误差的存在导致回波脉冲幅度的变化，也就是方位向包络的畸变。

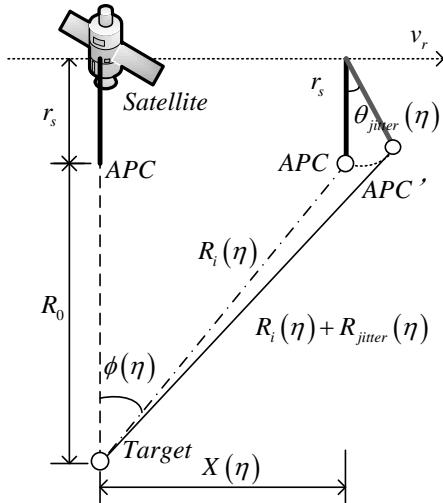


图 2-7 指向抖动的矩形近似几何模型

2.2.2.1 角误差和距离误差

在几何建模中，动态误差可以用两个变量表示，分别为距离误差 $R_{jitter}(\eta)$ 和角误差 $\theta_{jitter}(\eta)$ 。距离误差是指因为天线物理抖动引起天线相位中心 (APC) 位置的变化，从 APC 到目标点实际距离与理想距离存在差值 $R_{jitter}(\eta)$ 。角误差是指理想指向向量与实际指向向量之间的夹角 $\theta_{jitter}(\eta)$ 。两种误差都是方位时间 η 的函数，并且都会对成像质量产生影响。

误差角 $\theta_{jitter}(\eta)$ 是一个二维的空间角，为了建模的方便，可以把角误差分解为两部分，分别是投影在斜距平面上的方位向误差角 $\theta_{j,a}(\eta)$ ，以及投影在零多普勒平面上的距离向误差角 $\theta_{j,r}(\eta)$ 。这两个一维误差角的向量和可以唯一地确定角误差 $\theta_{jitter}(\eta)$ 。

在卫星系统中，通常来说直接测量得到的姿态数值是偏航，俯仰和滚动三个角度，误差分量可以分别记做 $\Delta\phi_y, \Delta\phi_p, \Delta\phi_r$ 。得到这三个误差分量之后，可以通过方程组来求解方位向和距离向的误差角。

$$\begin{cases} \theta_{j,a}(\eta) = \arctan \left[\left(\sin \Delta\phi_y \cdot \sin \theta_L + \sin \Delta\phi_p \cdot \cos \theta_L \right) \right. \\ \quad \left. / \left(1 + \cos \Delta\phi_y \cdot \cos^2 \theta_L + \cos \Delta\phi_p \cdot \sin^2 \theta_L - \cos \Delta\phi_r \right) \right] \\ \theta_{j,r}(\eta) = \arctan \left\{ \left[\left(\cos \Delta\phi_y \cdot \cos \theta_L - 2 \right) \cdot \cos \theta_L \cdot \sin \theta_L + \sin \Delta\phi_r \right] \right. \\ \quad \left. / \left(1 + \cos \Delta\phi_y \cdot \cos^2 \theta_L + \cos \Delta\phi_p \cdot \sin^2 \theta_L - \cos \Delta\phi_r \right) \right\} \end{cases} \quad (20)$$

实际上 SAR 卫星波束指向抖动的幅度非常小， $\Delta\phi_y, \Delta\phi_p, \Delta\phi_r \ll 1 rad$ ，因此工程分析中还可以对方程组(20)做进一步的化简和近似处理，得到

$$\begin{cases} \theta_{j,a} \approx \Delta\phi_y \cdot \sin \theta_L + \Delta\phi_p \cdot \cos \theta_L \\ \theta_{j,r} \approx \Delta\phi_r \end{cases} \quad (21)$$

简化之后的方程组表明，偏航和俯仰角姿态指向抖动主要引起天线方位向波束指向抖动；滚动角姿态指向抖动主要导致天线距离向波束指向抖动。

2.2.2.2 两种误差的约束关系

距离误差 $R_{jitter}(\eta)$ 是理想距离和实际距离之差，这也是传统的机载 SAR 运动补偿中最重要的一个变量。而抖动产生的距离误差的最大值 $\text{MAX}\{R_{jitter}\}$ ，也是衡量距离误差对成像影响强弱程度的重要指标。

角误差和距离误差之间存在一定的关联性。假设误差角已知，地面上不同位置的目标点的距离误差不同。经过理论推导和仿真发现，最大距离误差点发生在这样的位置 T_m ， T_m 位于天线照射区域与误差角平面相交的线段的端点上；在误差角平面内， T_m 与实际 APC 位置处于天线理想波束中心线的两侧。

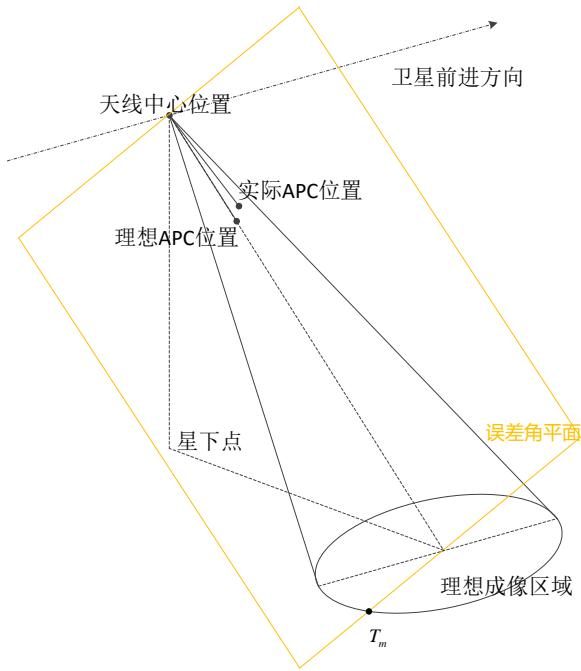


图 2-8 最大距离误差点示意图

随着误差角平面与斜距平面之间夹角的变化，最大误差距离也有所不同，并且这种变化关系与天线照射的二维方向图有关。但是两个平面夹角变化对最大距离误差的影响不大，此处为了简便，取斜距平面为误差角平面，得到照射区域内的最大距离误差为：

$$\begin{aligned}
 MAX\{R_{jitter}\} &= \sqrt{\left(\frac{L_{SAR}}{2} + r_s \sin \theta_{jm}\right)^2 + \left[R_0 + r_s(1 - \cos \theta_{jm})\right]^2} - \sqrt{\left(\frac{L_{SAR}}{2}\right)^2 + R_0^2} \\
 &\approx \left\{r_s L_{SAR} \theta_{jm} + r_s (R_0 + r_s) \theta_{jm}^2\right\} / \left\{2 \sqrt{\left(\frac{L_{SAR}}{2}\right)^2 + R_0^2}\right\} \\
 &\approx \frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{2}
 \end{aligned} \tag{22}$$

在公式(22)的推导中使用了泰勒展开和小角度近似。式中的 θ_b 是矩形近似模型中的天线方位向波束宽度。

2.2.3 误差信号模型

上一节讨论的距离误差和角误差，都能够直接影响到回波信息。所以当成像过程中伴随着天线抖动的时候，点目标的回波信号（基带）不能再用等式(5)来

表示，而是需要将距离误差 $R_{jitter}(\eta)$ 和角误差 $\theta_{jitter}(\eta)$ 带入信号模型，抖动中收集到的点目标基带信号为：

$$\begin{aligned} s_r(\tau, \eta) = & A' \omega_r \left\{ \tau - 2[R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)]/c \right\} \cdot \omega_a [\phi(\eta) + \theta_{jitter}(\eta)] \\ & \times \exp \left\{ j\pi K_r \left(\tau - 2[R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)]/c \right)^2 \right\} \\ & \times \exp \left\{ -j4\pi f_0 [R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)]/c \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

这里的 ω_r 和 ω_a 分别为距离向和方位向的包络，两个指数项分别为距离向和方位向的相位； $\phi(\eta)$ 是没有抖动的情况下，从目标点视线向量到天线中心线向量的角度， $R_i(\eta)$ 是理想情况下的距离。

从表达式中可以看出，距离误差 R_{jitter} 会影响距离向包络、相位和方位向相位，而角误差 θ_{jitter} 仅对方位向包络产生影响。SAR 成像结果的推导过程中需要对等式(23)进行傅立叶变化，匹配滤波等操作，但是误差项的存在使得本来就包含了二次相位的等式变得更加复杂。而驻定相位原理能否适用，距离徙动校正之后会对信号产生怎样的影响，这些问题全都存疑，需要结合必要的推导和近似进行解答。

2.2.4 回波信号生成系统

在抖动对成像影响的分析以及抖动补偿研究的过程中，需要包括实时指向角度的雷达回波信号。通常情况下，抖动角度由星载传感器测量得到，回波数据是雷达接收机收集到的信号。为了研究抖动的影响和补偿，希望天线的指向抖动具有某些典型特征，但是公开的 SAR 数据没办法满足这一条件。因此，本文的回波数据都是通过仿真计算得到，生成回波信号的子系统流程框图如图 2-9 所示。

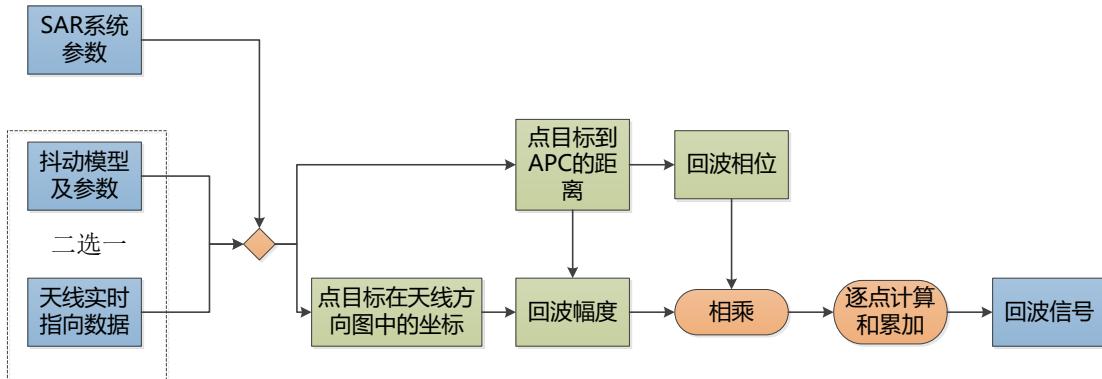


图 2-9 回波信号生成分系统流程图

回波生成系统的输入包括 SAR 系统参数以及天线的实时指向数据，也可以用天线抖动模型替代指向数据，仿真系统为两种情况都提供了接口。使用 SAR 系统参数构建一个空间坐标和信号时序之后，计算每个慢时间点上点目标到 APC 的距离，生成回波相位；计算每个时刻点目标在天线方向图中的角度，再加上距离增益，用以生成回波幅度。回波幅度和相位相乘，得到单点的回波信号。

如果是仿真区域成像的回波数据，则首先将地面区域信息放在目标矩阵中，矩阵信息包含目标的坐标和反射率，然后对矩阵中的每个点进行以上的回波计算过程。最后将回波信号与时间坐标叠加起来，得到整个区域的回波信号。

2.3 本章小结

本章简述了 SAR 回波及图像处理的过程，推导了过程中主要的信号表达式，这是本文研究最重要的理论基础。在第二节中建立了新的天线抖动几何模型和信号模型，给出了典型轻敏 SAR 卫星的系统参数，并建立了包含抖动误差的回波信号仿真生成模型。

第三章 天线指向抖动引起的 SAR 成像畸变

研究抖动对成像的影响是抖动补偿的理论基础，研究中需要解决抖动为什么会引起畸变，会导致怎样的畸变，抖动参数与产生的畸变特征之间又有怎样的量化关系等问题。现有的文献在抖动影响研究存在大量不足，仅能解释某些特殊的平面抖动的成像畸变特征，而且量化分析的精度较低。本章建立了更精确的抖动畸变分析模型，并将其推广以适用于多种类型的抖动。

本章首先对比相位和包络两种误差对回波信号的影响，得到轻敏 SAR 系统中的畸变误差源。然后推导畸变回波信号的成像过程，得到点目标畸变成像公式，建立了平面抖动中抖动参数与畸变之间的三种量化关系模型。将抖动与畸变之间的量化关系推广到倾斜平面抖动、三维抖动、多频抖动等多种不同的抖动模型中。并从一个全新的角度解释了低频抖动产生成像误差的机理。综合以上各种研究，给出了更精确的轻敏卫星的系统抖动容限。

3.1 抖动畸变的误差源

角误差和距离误差都会导致成像的畸变，但是两种误差对畸变的贡献有所不同。Nick Marechal^[123]和 Ni Chong^[132]继承传统成对回波理论的研究思路，从相位畸变入手研究抖动影响，并认定距离误差是回波畸变的主要原因；D. Giudici^[131]和 Chen Jie^[124]通过对角误差的重新建模，发现包络畸变在成像畸变中的作用。以上结论是针对不同 SAR 模型提出的，但都不能直接应用于轻敏 SAR 的系统模型。

在轻敏 SAR 卫星系统抖动畸变研究中，本文发现天线抖动中的角误差是导致成像畸变的最重要原因。相比之下，距离误差导致的成像畸变低了几个数量级，可以忽略不计。

通过实验实例说明如下。实验中含有方位向平面上的角误差，幅度约为 $5 \times 10^{-3} rad$ 。抖动中含有两个能量比较大的抖动频率，和一些随机抖动能量，如图 3-1 所示。

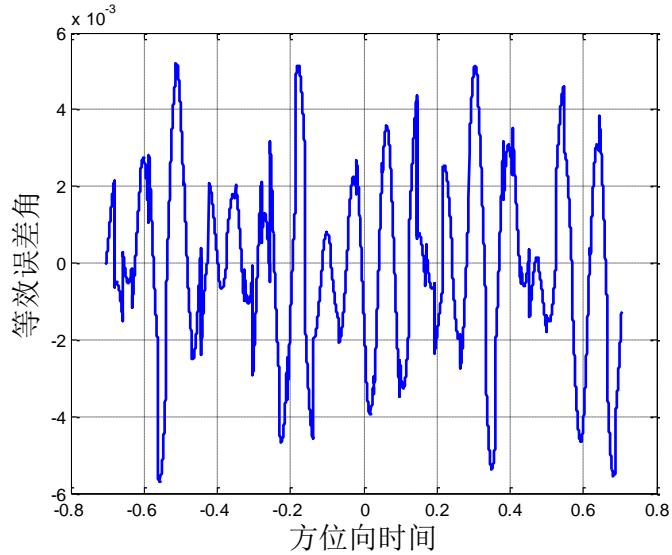


图 3-1 仿真实验中使用的等效平面误差角

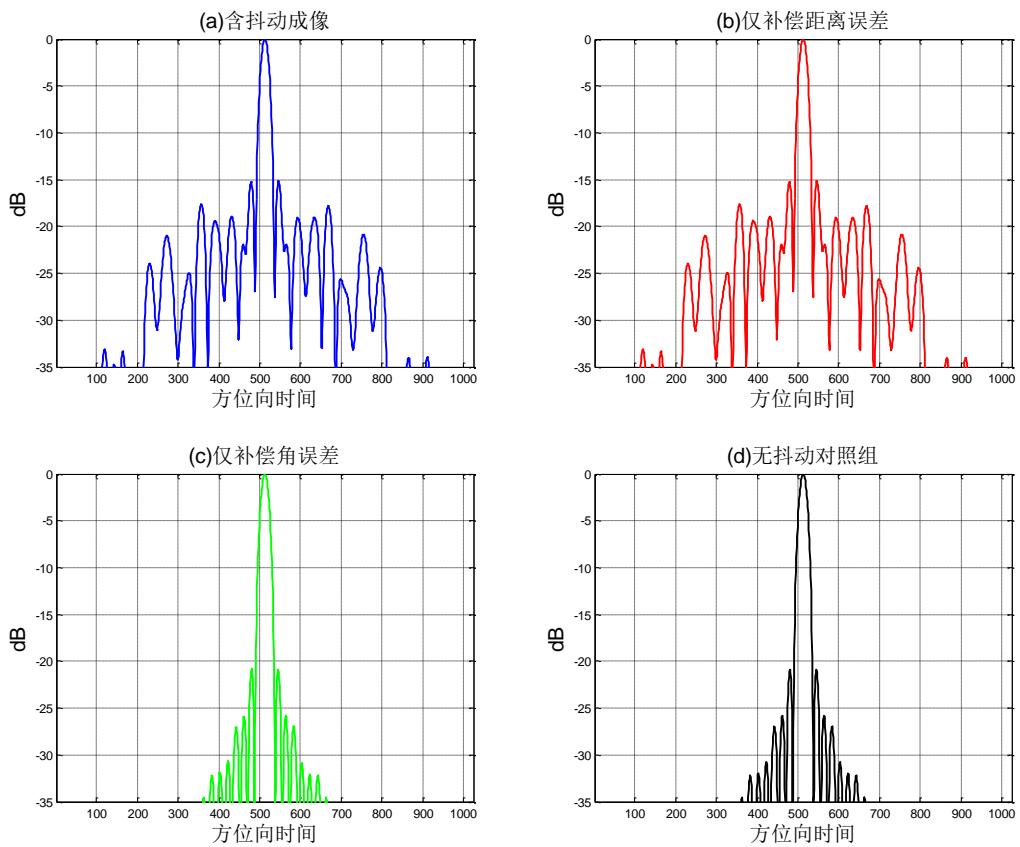


图 3-2 距离误差和角误差的对照试验

图 3-2(a)直接用含抖动的回波信号进行成像处理, 图示是方位时间的图像切面, 中央尖峰是成像点, 其旁瓣有大量的畸变能量, 最高的畸变旁瓣达到了-17dB,

图像质量明显恶化；将回波中的距离误差完全补偿，然后做成像处理得到图像(b)，可以看出图像并没有明显的质量提高。但如果完全补联回波信号角误差，成像结果如(c)图所示，成像结果与无抖动的对照组(图 d)几乎完全相同。

以上实验中忽略距离误差的影响而仅考虑角误差，对运动补偿算法的精度的影响非常小。角误差是导致成像畸变的主要原因，距离误差的影响可以忽略不计。接下来将通过理论推导将这一结论推广到一般的轻敏 SAR 卫星抖动成像中，推导中还将给出距离误差可以忽略的充分条件。

3.1.1 距离误差可忽略的充分条件

在传统的 SAR 雷达系统中，非理想运动轨迹是导致距离误差的主要原因，所以在运动误差和运动补偿研究中，距离误差一直是主要的研究对象，角误差往往被忽略不计。但是轻敏 SAR 卫星模型中两种误差影响程度的强弱却正好相反。传统的回波理论建模不适合轻敏 SAR 的研究模型，本文需要重新建模。

在上一章中推导了抖动中回波的基带信号，重写如下：

$$\begin{aligned} s_r(\tau, \eta) = & A' \omega_r \left\{ \tau - 2[R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)]/c \right\} \cdot \omega_a [\phi(\eta) + \theta_{jitter}(\eta)] \\ & \times \exp \left\{ j\pi K_r \left(\tau - 2[R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)]/c \right)^2 \right\} \\ & \times \exp \left\{ -j4\pi f_0 [R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)]/c \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

回波信号是个二维矩阵，前两项是距离和方位向的包络，后两项是距离和方向的相位。距离误差直接影响到距离向包络、以及距离和方位两个相位误差。距离向相位中的距离误差 $R_{jitter}(\eta)$ 是可以直接忽略的，因为发射脉冲的长度为

$10^{-5} \sim 10^{-4}$ sec 量级，相比于此 $R_{jitter}(\eta)$ 缓慢变化的，在脉冲时间内可以看作是一个定值。距离误差就不会影响到距离向相位，此项中的距离误差可以直接省略。
[134]

其他两项中的距离误差的影响需要在畸变信号的成像处理过程中进一步的讨论。距离向包络中的 $R_{jitter}(\eta)$ 可以影响到距离压缩之后的结果，间接影响到距离徙动校正；方位向相位中的 $R_{jitter}(\eta)$ 直接影响方位向脉冲压缩。

3.1.1.1 距离徙动畸变可忽略的充分条件

理想情况下，瞬时斜距 $R_i(\eta)$ 随方位时间而变化，是方位时间的双曲函数。这意味着在信号存储器中，照射时间内的目标回波能量存储在不同的距离单元内，这种现象称为距离单元徙动 RCM。高效的 SAR 处理算法都需要先去除回波信号中的 RCM，将点目标的回波能量集中在一个距离单元内，然后再做成像压缩处理。

但是，天线的抖动带来的距离误差导致了天线相位中心的位置变化，这改变了回波能量在距离向的分布，以及压缩后的峰值位置。经过距离徙动校正之后，部分能量可能无法被校正到理想距离单元，这会导致理想距离单元内回波信号的总能量下降和带宽降低，成像结果的方位向分辨率下降，积分旁瓣比升高。而同时回波能量泄漏到了邻近距离单元中，也会导致旁瓣能量升高，从而引起距离向的积分旁瓣比升高，并有可能导致距离向分辨率下降。总的来说，距离徙动误差产生的图像畸变是二维畸变。

距离误差与距离向分辨率的相对大小决定了二维畸变的程度，距离误差越大，单个点目标的回波能量在处理中发生距离溢出的概率就越高，发生严重成像畸变的概率也就越大。定义抖动距离误差与斜距分辨率 ρ_r 的比值为 $\alpha_{j,\rho}$ ， $\alpha_{j,\rho}$ 与畸变程度正相关，可用于衡量畸变程度的大小。

成像畸变与 $\alpha_{j,\rho}$ 的关系在现有研究中已有较为成熟的结论。一般情况认为，当回波位置偏移误差小于四分之一个距离分辨单元时，距离徙动导致的成像畸变非常小，不需要做额外的运动补偿处理。也就是比值 $\alpha_{j,\rho}$ 小于 $1/4$ 的时候，抖动通过距离单元徙动对成像畸变的影响完全可以忽略不计。^[135]

误差角和距离误差之间的关系上文已经给出：

$$\text{MAX} \left\{ R_{jitter} \right\} = \frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{2} \quad (25)$$

在典型的星载轻敏 SAR 系统中， r_s 典型值一般为 $1\sim2\text{m}$ ， θ_{jm} 和 θ_b 为 $0.01\sim0.1\text{rad}$ 量级。这样得到的 R_{jitter} 的最大值比距离向分辨率低了 $2\sim4$ 个量级，误差系数 $\alpha_{j,\rho}$ 为 $10^{-4}\sim10^{-2}$ ，远小于阈值 $1/4$ 。

除此之外，当距离误差达到最大值的时候，成像点位于雷达照射的边缘，回波能量低，对成像的贡献小。所以即便是 $\alpha_{j,\rho}$ 能够达到阈值，实际的徙动畸变仍然非常有限。最终得出抖动产生的距离误差通过距离单元徙动对成像畸变的贡献可以忽略的充分条件为：

$$\frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{2\rho_r} < \frac{1}{4} \quad (26)$$

前面提到，抖动引起的误差可能影响到的回波信息只有距离单元徙动和方位向相位；两者之中，又只有距离徙动导致的畸变是二维畸变。所以，在轻敏 SAR 系统中，抖动导致的图像畸变通常仅存在于方位向。这是轻敏 SAR 系统抖动成像畸变与传统 SAR 系统轨迹误差成像畸变之间一个重要区别。这一结论可以大大降低抖动影响分析的难度和抖动补偿的运算量。

3.1.1.2 方位向相位畸变可忽略的充分条件

当抖动没有对距离徙动产生明显的影响时，可以认为经过 RCMC 处理之后，点目标回波的大部分能量都集中在一个距离单元内，这时候的回波信息当作一个一维信号来处理而不再是二维信号，理论推导过程大大简化。距离单元徙动校正之后的回波表达式为：

$$S_{rc}(\eta) = A_0 \omega_a [\phi(\eta) + \theta_{jitter}(\eta)] \exp\{-4\pi f_0 [R_i(\eta) + R_{jitter}(\eta)] / c\} \quad (27)$$

传统的分析思路通常从相位角度寻找畸变原因，其中用来描述相位误差的最常用参数是二次相位误差 QPE。在相位误差线性误差为主的时候，QPE 可以很好地表征相位误差和畸变之间的关系，但是如果相位误差以抖动分量为主，则 QPE 与畸变量没有明显关系。相比之下，最大相位误差幅度更适合描述指向抖动导致的畸变误差。忽略回波包络畸变而仅考虑相位畸变，得到最大相位误差幅度和图像质量参数的典型相关关系如图所示。

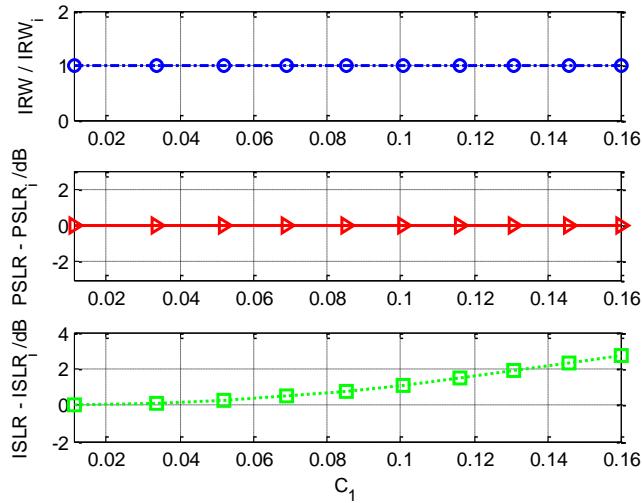


图 3-3 最大相位误差与图像质量参数之间的关系

如图 3-3 所示是距离误差与图像畸变之间的关系，图中横坐标 C_1 是因距离误差引起的最大相位差： $C_1 = \max\left(4\pi \cdot \frac{R_{jitter}}{\lambda}\right) \approx 2\pi \cdot \frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{\lambda}$ ，图(a) 纵坐标是冲击响应宽度 IRW 和方位向分辨率的比值，图(b) 的纵坐标是峰值旁瓣比与理想值之差，图(c) 是积分旁瓣比与理想值之差。从图中可以看到，距离误差抖动主要结果是积分旁瓣比下降，从而图像的信噪比下降，动态范围降低。另外，在仿真中还发现，如果把 C_1 进一步增大，峰值旁瓣比会明显增加，只不过这种情况在星载轻敏 SAR 系统中几乎不会发生。在卫星运行仿真中，抖动引起的最大相位误差幅度小于 0.01，这种程度的误差导致的成像畸变可以忽略。

如果系统对方位向 ISLR 下降有 1dB 容忍阈值，对应图中 $C_1 = 0.1$ ；这种情况下，方位向相位畸变的影响可忽略的充分条件可以写为：

$$2\pi \cdot \frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{\lambda} < 0.1 \quad (28)$$

总结上面两节的分析结论，得到轻敏 SAR 系统中距离误差可以忽略的充分条件为：

$$\begin{cases} \frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{2\rho_r} < \frac{1}{4} \\ 2\pi \cdot \frac{r_s \theta_{jm} \cdot \theta_b + r_s \theta_{jm}^2}{\lambda} < 0.1 \end{cases} \quad (29)$$

3.1.2 角误差引起成像畸变的机理

距离误差对轻敏 SAR 成像畸变的影响非常小，如上文所述；那么主要的成像畸变则由角误差导致，角误差导致成像畸变的机理分析如下。

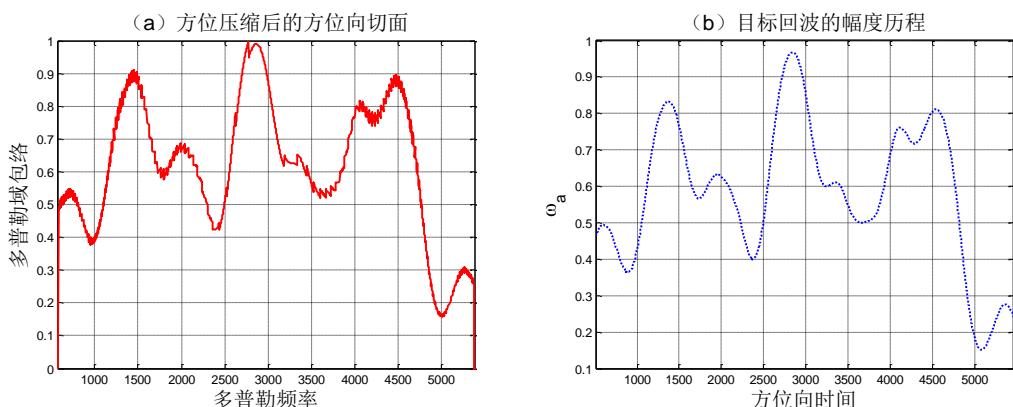
在满足不等式组(29)的前提下，RCM 可以得到理想校正，同时方位向误差幅度低于阈值，最终的成像结果可以写成：

$$s_{ac}(\eta) = A_l \cdot IFT \{W_a(f_\eta)\} \quad (30)$$

式中的 A_l 是一个复数，包含目标反射率、传输损耗以及其他幅度和相位信息。 W_a 是在距离多普勒域（距离向时域、方位向频域）的方位向包络函数，当方位向包络满足缓变假设的时候，可以根据驻定相位原理 (POSP) 得到

$$W_a(f_\eta) = \Pi\left(\frac{f_\eta}{B_d}\right) \cdot \omega_a \{\phi[\eta(f_\eta)] + \theta_{jitter}[\eta(f_\eta)]\} \quad (31)$$

式中 $\Pi(\cdot)$ 是矩形窗函数。由于方位向时频关系 $\eta(f_\eta)$ 近似为线性函数，这就意味着采样带宽内的多普勒域包络 W_a 和合成孔径时间内的时域包络 ω_a 有近似相同的形状。因此畸变的时域包络 ω_a 经过傅立叶逆变换之后可以直接得到近似的成像结果（方位向切面）。



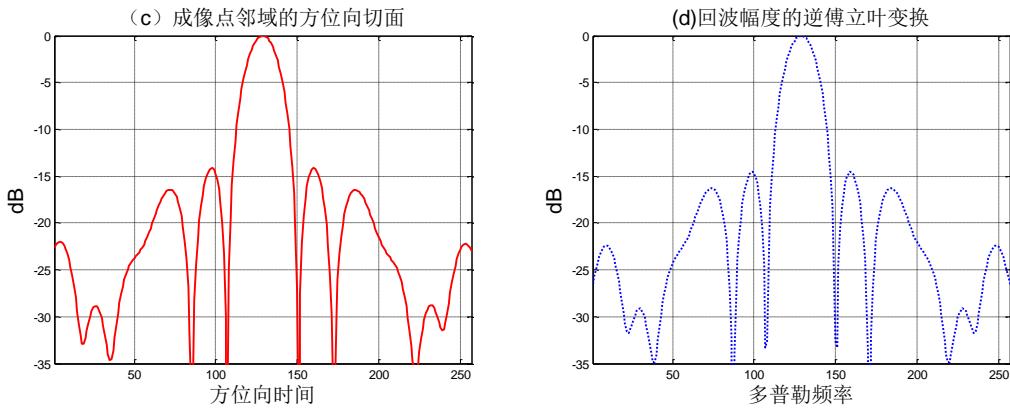


图 3-4 角误差引起成像畸变的机理说明

上图是有抖动的点目标回波信号的成像过程。图(a) 和图(b) 分别是 W_a 和 ω_a 的曲线，为了保持一致，对 ω_a 也做了相同的加窗处理（SAR 成像处理中需要通过加窗来抑制旁瓣）。除了少量噪声之外， W_a 和 ω_a 的曲线形状基本一致。图(c) 是成像结果的方位向切面也就是 W_a 逆傅立叶变换，图(d) 是 ω_a 的逆傅立叶变换，图(c) 和(d) 的曲线也基本一致。仿真过程直观地说明了图像畸变是因为角误差引起，方位向的包络曲线的逆傅立叶变换就是近似的畸变成像结果。

在下文的分析中，我们将不再讨论距离误差的影响，而仅讨论角误差的影响和补偿。一方面是因为在满足不等式组(29)的前提下，距离误差产生的影响小到可以忽略；另一方面，借鉴传统的运动补偿算法，可以对成像结果进行两步补偿：先补偿距离误差，然后补偿角误差。所以即使是在距离误差较大或者补偿要求较高的情况下，如果能有效补偿距离误差导致的畸变，则本文的结论和方法仍然有效。

3.2 方位向单频抖动与畸变的量化关系

在上一节确定了轻敏 SAR 系统中导致成像畸变的主要误差源——角误差引起的回波幅度畸变。并且通过理论分析，二维的回波矩阵已经被简化成了一个一维向量，通过分析这个一维信号的数字处理过程，可以得到抖动参数与畸变参数之间的关系。

本文的理论分析首先从最简单模型——斜距平面内单频抖动模型入手，给出了成像畸变结果的理论推导过程。得出的公式可以解释抖动参数与畸变参数的关

联性，公式和推论都对此后的理论分析有非常重要的意义。现有的文献中已经有对单频抖动成像畸变的分析，但是精度不高、对畸变细节的描述不足、也没有考虑到相位的影响，本文对这一理论进行了改进。

3.2.1 点目标成像的公式推导

角误差变量是一个空间角，可以看作是慢时间自变量 η 的二维函数 $\theta_{jitter}(\eta) = [\theta_{j,a}(\eta) \ \theta_{j,r}(\eta)]$ 。在本节中首先假设抖动角误差的能量主要集中在方位向，垂直方向的抖动能量可以忽略，这个一维误差角定义为 $\theta_e(\eta)$ 。在这种情况下误差角大小与天线的实际指向角度、理想指向三者之间的关系相对简单： $\theta(\eta) \approx \phi(\eta) + \theta_e(\eta)$ 。简化后的回波包络写为：

$$\omega_a(\eta) \approx p_a^2 \left[\frac{\phi(\eta) + \theta_e(\eta)}{\theta_b} \right] \quad (32)$$

式中的 $p_a[\cdot]$ 是天线的方位向方向图， θ_b 是天线的方位向波束角。

式(32)可以做近似的多项式展开，以方便进一步的推导。多项式近似有很多种方法，比较常用的是泰勒分解，但是本文更推荐使用格拉姆施密特过程，后者的精度远高于泰勒近似^[1]，使用格拉姆施密特过程展开的细节在本文中不做具体说明，展开式写作： $p_a^2(\theta) = \sum_{i=0} d_i \cdot \theta^i$ 。从而近似之后的 RD 域方位向包络的 N 次展开式可以写为：

$$W_a = \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\frac{\theta_e}{\theta_b} \right]^m \left[\frac{\varphi}{\theta_b} \right]^n \quad (33)$$

$$\kappa_{m,n} = d_{m+n} \frac{(m+n)!}{m!n!}$$

这里做进一步的简化，假设抖动的模型是一个单频抖动：

$$\theta_e = \alpha_e \exp \left(2\pi \frac{f_e}{K_a} \cdot f_\eta + p_e \right) \quad (34)$$

式中， α_e 、 f_e 、 p_e 分别是抖动幅度，频率和相位。误差角的 m 次方可以写

成: $\left[\frac{\theta_\varepsilon}{\theta_b} \right]^m = \left(\frac{\alpha_\varepsilon}{\theta_b} \right)^m \exp \left(2\pi \frac{mf_\varepsilon}{K_a} \cdot f_\eta + mp_\varepsilon \right)$ 。将上面的简化式带入, 得到最终的点目标成像表达式为:

$$\begin{aligned} s(\eta) &= A_i \cdot IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\frac{\theta_\varepsilon}{\theta_b} \right]^m \left[\frac{\varphi}{\theta_b} \right]^n \right\} \\ &= A_i \cdot IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \right\} \otimes IFT \left\{ \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\frac{\theta_\varepsilon}{\theta_b} \right]^m \left[\frac{\varphi}{\theta_b} \right]^n \right\} \\ &= A_i \cdot IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \right\} \\ &\quad \otimes IFT \left\{ \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left(\frac{\alpha_\varepsilon}{\theta_b} \right)^m \exp \left(2\pi \frac{mf_\varepsilon}{K_a} \cdot f_\eta + mp_\varepsilon \right) \left[\frac{B_d}{\theta_b} f_\eta \right]^n \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

式中的 $\Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right)$ 经过逆傅立叶变换之后得到的是一个尖锐的 *sinc* 波峰, 多普勒带宽越宽, 波峰越窄, 分辨率就越高; 式中的 $\exp \left(2\pi \frac{mf_\varepsilon}{K_a} \cdot f_\eta + mp_\varepsilon \right)$ 项经过 IFT

之后得到一个偏置量, 与前面的 *sinc* 函数卷积, 影响 *sinc* 函数部分能量的位置;

最后的 $\left[\frac{B_d}{\theta_b} f_\eta \right]^n$ 函数则是对 *sinc* 函数的求 n 次微分。再加上合成孔径雷达的一些几何和信号关系, 得到化简的点目标成像的畸变结果:

$$s(\eta) = A_i B_d \cdot \sum_{m,n} \kappa_{m,n} \left(\frac{1}{2\pi j} \right)^n \cdot \sum_k \left(\frac{\alpha_\varepsilon}{\theta_b} \right)^m e^{jmp_\varepsilon} s_n \left(\eta + mf_\varepsilon / K_a \right) \quad (36)$$

$$\text{式中, } s_n(\eta) = \frac{1}{B_d^{n-1}} \left\{ \text{sinc} \left[B_d (\eta) \right] \right\}^{[n]}$$

这是在伴随着单频方位向抖动的情况下, 一个点目标的轻敏 SAR 系统成像结果。成像结果可以看作是多个波峰的叠加, 波峰的位置由 $f_\varepsilon / K_a = (f_\varepsilon \cdot T_a) / B_d$ 决定, 峰值大小由主要和 $\alpha_\varepsilon / \theta_b$ 决定, 同时受到天线方向图的影响。

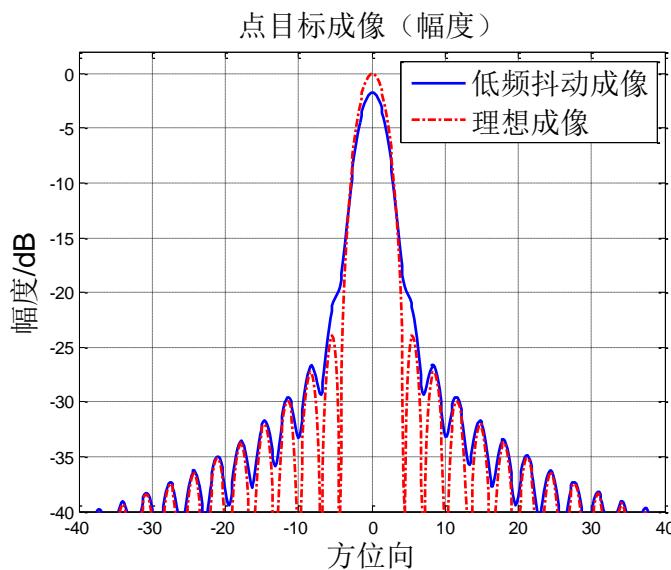
因为在公式中, 抖动频率总是与合成孔径时间在一起, 以类似 $f_\varepsilon \cdot T_a$ 的形式存在, 可以定义一个无量纲变量: 相对抖动频率, $f_{rlt} = f_\varepsilon \cdot T_a$ 另外, 抖动幅度

总是与波束的方位向角度在一起，以 $\alpha_\varepsilon / \theta_b$ 的形式存在，可以定义另外一个无量纲变量：相对抖动幅角， $\alpha_{rl} = \alpha_\varepsilon / \theta_b$ 。通过改变这两个无量纲参数研究成像畸变的规律，得到的试验结论具有普遍性，对多数的轻敏 SAR 卫星系统都适用。

3.2.2 高低频抖动的划分

如果将实际系数带入上面的表达式中，可以发现 $m=0$ 对应的能量占到抖动成像结果能量中的大部分，这些能量相互累加，最终构成理想位置的图像点；相反，对应 $m \neq 0$ 的波峰则构成干扰能量。考虑到主波峰的 3dB 宽度等于 $1/B_d$ ，所以当 $0 < f_\varepsilon / K_a < 1/B_d$ ，即 $0 < f_\varepsilon < 1/T_a$ 时，波峰位于成像点附近，并且畸变能量与理想成像的主瓣部分重叠，影响理想成像点的形状。相反，当 $f_\varepsilon > 1/T_a$ 畸变波峰与理想成像能够彼此区分，这也就产生了位于理想成像点附近的一系列的虚像。

如果从冲击响应的角度来讲，前者可以看作是系统响应的主瓣畸变，这种抖动被称为低频抖动。而后者畸变能量叠加在系统响应的旁瓣，被称为是高频抖动。



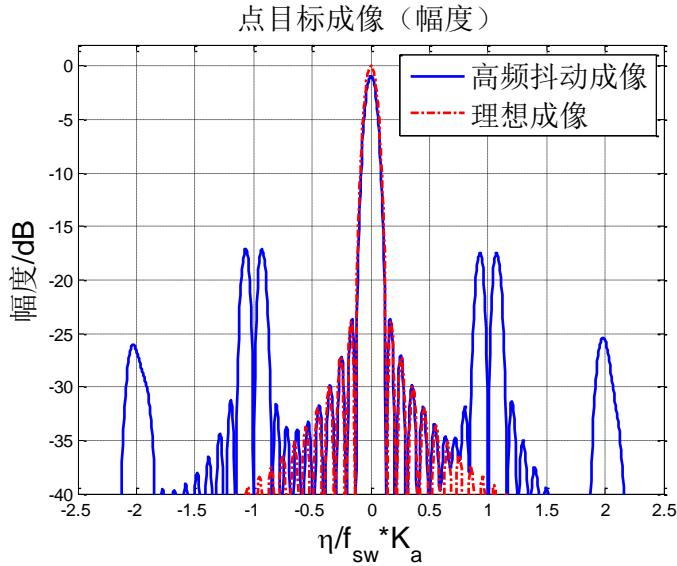


图 3-5 高低频抖动成像与理想成像的对比

高低频抖动与理想成像的对比如图 3-5 所示。上面一副图中蓝色曲线是低频抖动的成像结果，红色虚线是理想成像的结果，这里的抖动模型选择为单频抖动，参数设定为 $[0.3, 0.3, \pi/2, 0]$ （四个数字分别为相对抖动频率，相对抖动幅度，抖动相位和抖动面相对斜距平面的旋转角度）。这里低频抖动引起的是主瓣的畸变，主瓣的形状和幅度都会发生一定的变化。

而下面一副图中的蓝色曲线是高频抖动的畸变曲线，抖动参数设定为 $[10, 0.3, \pi/2, 0]$ 。高频抖动引起的旁瓣的畸变，理想成像的左右两侧出现了对称的波峰，强度达到了-17 dB，远远超过 SAR 系统可容忍的旁瓣幅度。另外，由于虚像能量的溢出，主成像的幅度也有所降低。

在本文的模型中，高低频的划分阈值为 2.6Hz，其他的 SAR 系统的高低频阈值一般也在 1-3Hz 之间。这样大部分由于外界热冲击导致的天线抖动属于低频抖动的范畴，而直接受到飞轮影响而引起的天线抖动则大部分属于高频抖动的范畴。

3.2.3 抖动频率与畸变位置

从图 3-5 中下图可以看出，方位向的单频抖动导致的畸变结果，是沿方位向对称地分布于主成像两侧的虚像。同时观察到，虚像峰值正好处于横坐标整数点位置，也就是 $\eta = n \cdot f_e / K_a$ 位置，这与公式(36)中的结论完全相符。也就是说对于给定的星载 SAR 系统，抖动导致的虚像间距与抖动频率成正比，与其他抖动

参数或成像参数无关。

通过一组实验可以更清楚地说明这种规律：实验中在回波收集的过程中加入方位向的单频抖动，然后观察成像结果。在实验中线性地改变抖动的频率，并保持其他的仿真参数不变，将方位向切面沿y轴排布，得到最终的仿真结果如图 3-6 所示。

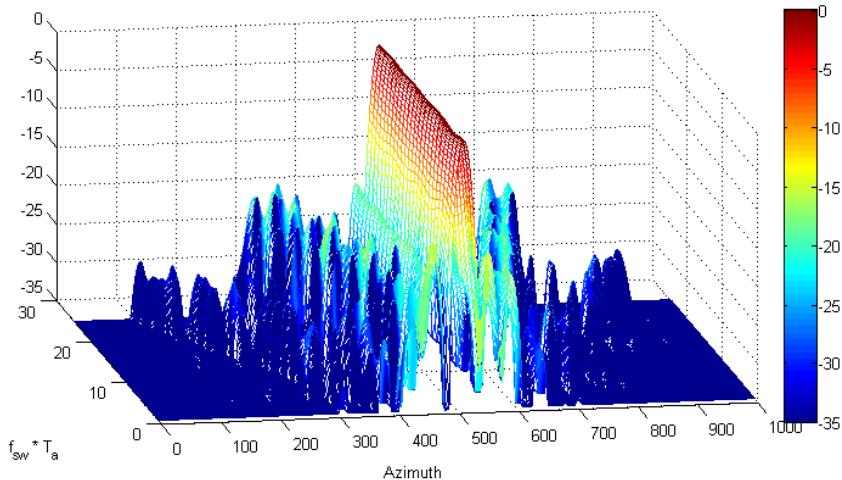


图 3-6 方位向冲击响应随抖动频率的变化趋势

随着抖动频率的增加（图中的 f_{sw} 轴），图像中 $\eta = nf_{sw} / K_a$ (n 为正整数) 这簇直线上出现了虚像，虚像出现的位置与理论结果相符。主成像的幅度不随着抖动频率的变化而变化，这与公式中的结论相符；但是，虚像的幅度却存在着高低起伏，这是因为受到主像旁瓣的能量干扰。

3.2.4 抖动幅角与畸变幅度

从点成像公式中看出，影响虚像幅度的因素主要是相对抖动幅度，天线方向图也会对成像畸变结果产生影响，但是对于一个固定的系统来说，这种影响是不变的。

$$s(\eta) = A_1 B_d \cdot \sum_{m,n} \kappa_{m,n} \left(\frac{1}{2\pi j} \right)^n \cdot \sum_k \left(\frac{\alpha_\varepsilon}{\theta_b} \right)^m e^{j m p_\varepsilon} s_n \left(\eta + m f_\varepsilon / K_a \right) \quad (37)$$

$$\text{式中, } s_n(\eta) = \frac{1}{B_d^{n-1}} \left\{ \text{sinc} [B_d(\eta)] \right\}^{[n]}$$

在方位向单频抖动模型中，畸变幅度只与抖动的幅度有关，而与其他参数无关，通过一组实验可以验证这个结论。实验参数设定为：相对抖动频率为 10；

相对抖动幅角的变化范围为: $0.01\theta_a \sim 0.9\theta_a$; 初始抖动相位设定为 0。仿真结果如图 3-7 所示, 实验结论的绘制方式与上一节中图 3-6 类似。

图中, 随着抖动幅度的增加, 主峰峰值具有下降的趋势, 各虚像的峰值处于逐步上升的趋势, 说明主图像灰度降低, 而虚像灰度增强, 这会导致图像对比度的降低。注意到距离主目标较近的虚像与较远虚像的上升趋势不同, 在抖动幅度较低的时候, 虚像的幅度依次降低, 如图 3-6 所示; 但是当在抖动幅度较大的情况下, 第二虚像的幅值超越了第一虚像。这一点将在下文中说明。

另外, 图中还可以看出, 虚像峰值所在的直线与抖动幅度变化的方向平行, 这说明幅度的变化不会影响虚像的位置。

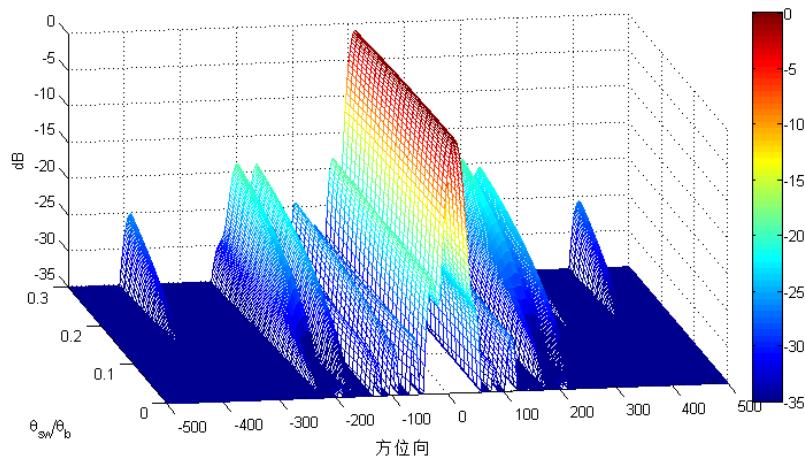


图 3-7 高频抖动下方位向冲击响应随方位向抖动幅度的变化

以上是对抖动幅角与畸变幅度关系的初步分析, 而在卫星模型已知的前提下, 借助公式(36)还可以得到两者之间的定量关系。抖动参数与成像畸变之间的量化关系对于轻敏 SAR 系统的设计工作有非常重要的意义。在卫星设计中, 结合抖动与畸变之间量化分析的结果可以给出雷达系统对平台提供的指向稳定度的要求。在卫星使用过程中, 若天线指向发生意外的抖动, 借助量化分析的结果也可以更精确地估计抖动对成像的影响程度, 为是否进行成像, 成像侧视角度权衡及成像参数等一系列实际问题提供依据。

本文在现有理论基础上, 重新建模并得到了的抖动影响的理论和公式。在理论分析中详细阐述了高低的划分, 和多种抖动模型的影响。除此之外, 公式(36)对点目标畸变中的旁瓣幅度有更精确的理论估计结果。因为此前研究中有涉及到方位向和距离向单频抖动的旁瓣建模和量化分析, 所以本文也对这两种抖动做了仿真, 并且将本文理论估计结果、仿真结果、和现有理论的估计结果做了对比。

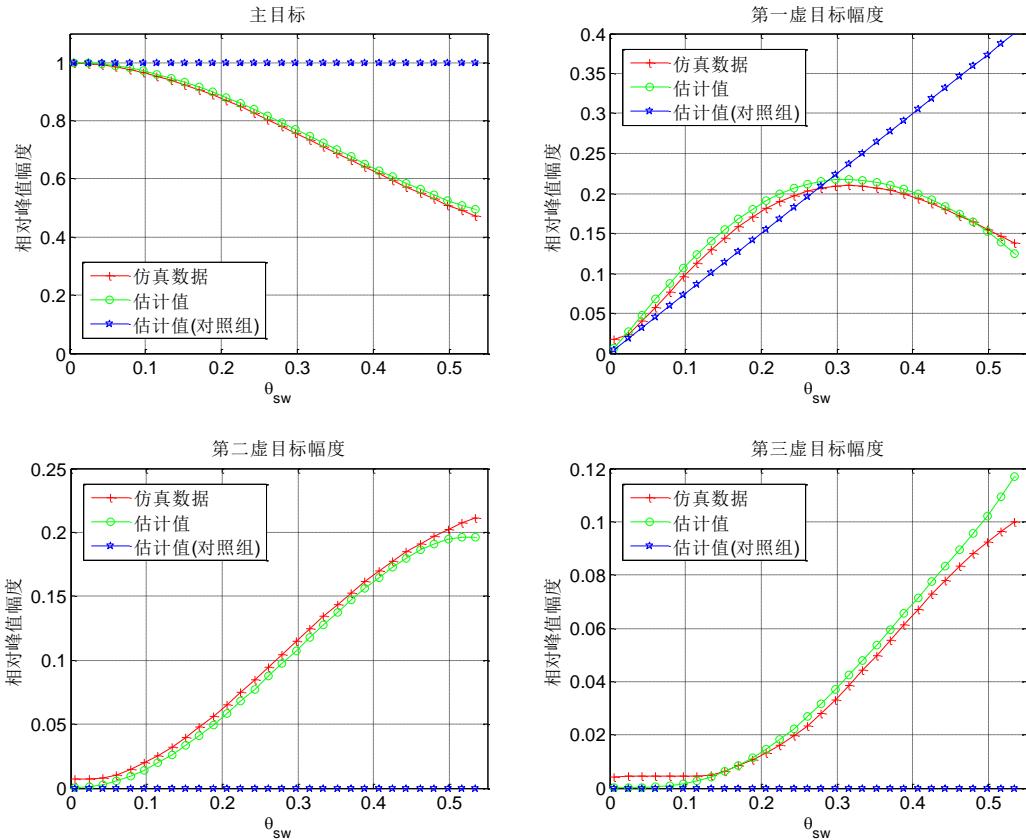


图 3-8 主瓣和旁瓣幅度的估计性能对比

在论文[125]给出的旁瓣幅度估计公式中认为，伴随天线抖动得到的成像结果，主成像幅度就是理论幅度，第一虚像与单频抖动的最大幅度成正比，并且没有给出其他虚像的幅度值，该估计理论作为本文的对照组数据以蓝色曲线和五角形标出。

利用本文的理论结果，不仅可以估计得到更精确的主成像和第一虚像的幅度值，还能得到精确的第二第三虚像的幅度估计，从图中可以看出，第二虚像的幅度在抖动幅度较大的时候甚至超过了第一虚像的幅度，成为影响图像质量的最主要因素。图 3-8 中，本文给出的理论估计值以绿色曲线标出，仿真结果以红色曲线标出。两个曲线之间的差距非常小。

表格 3 误差估计性能

	最大估计误差(%)	平均估计误差(%)
目标图像	2.44	1.05
虚像 1	1.32	0.77
虚像 2	1.54	0.66

虚像 3	1.69	0.44
------	------	------

表格 3 给出了估计算法的误差性能, 表中的数值是估计误差(估计值和仿真值之间的误差)与理想成像幅度之间的比值。最大估计误差约为 1.3~2.4%, 平均估计误差为 0.4~1%。产生估计误差的主要原因, 一是在建模中没有考虑主成像的旁瓣对虚像幅度的影响, 另外也和天线方向图的多项式展开只取了前三项有关系。但是相比此前的高达 40% 的估计精度, 提高了几十倍。

3.2.5 抖动相位与畸变相位

按照公式(36), 位于 $\eta = mf_e / K_a$ 位置的序列为 m 的虚像, 其相位应该是 mp_e , 也就是说, 虚像的相位应该随抖动相位线性变化, 而且距离主像越远的虚像, 其相位变化越快。

在此通过一组实验来说明抖动相位与畸变峰值相位之间的关系。在实验中, 设定相对抖动频率为 6, 相对幅度为 0.35, 抖动相位从 0 到 2π 线性变化。抖动模型仍然是方位向的单频抖动。

最终得到两组仿真结果, 第一组实验结果说明抖动相位与虚像峰值相位的变化关系, 如图 3-9 所示, 图中的蓝色和绿色两条虚线分别代表第一虚像的左右两个峰值的相位, 两者恰好有相位差为 π , 也就是相位恰好相反, 这是因为 sinc 函数的奇数次导数为奇函数。第二虚像的峰值相位变化速率恰好是第一虚像相位变化速率的两倍, 这与从公式中得到的理论结果相符。

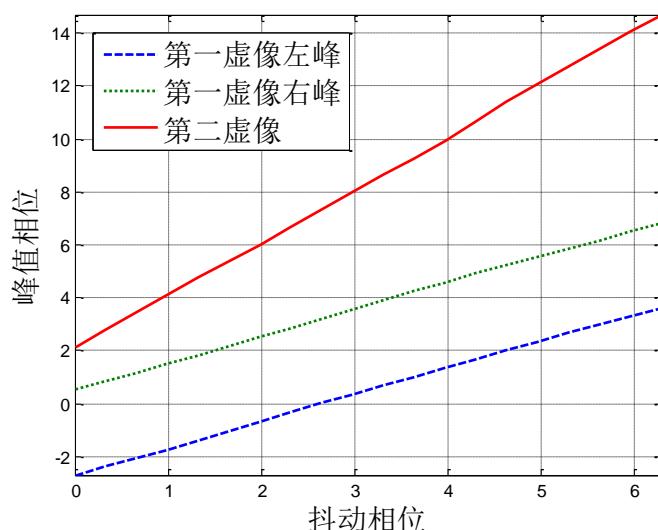


图 3-9 抖动相位与虚像峰值相位的变化关系

另外一组仿真结果用来说明，抖动相位既不会影响虚像的位置，对虚像幅度也几乎没有影响。实验结果如图 3-10 所示，虚像的位置保持不变，幅度有非常小的变化，也是因为受到主成像的副瓣的影响而导致的。

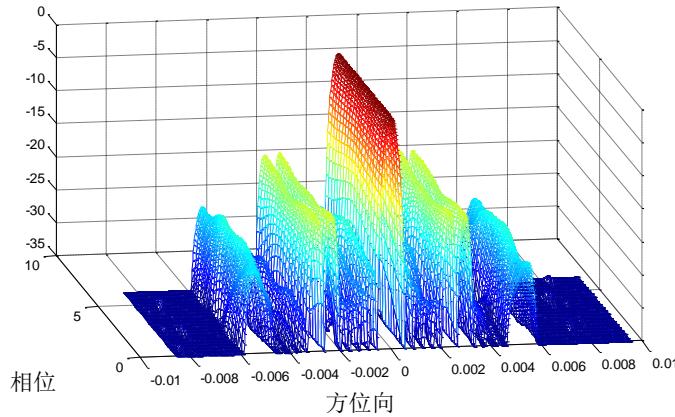


图 3-10 成像切面随抖动相位的变化规律

总的来说，抖动的频率、幅角、相位三个参量会分别影响到成像结果的虚像位置、大小和相位。对于具体的模型，还可以得到抖动参数与成像畸变的量化关系，这是抖动引起图像畸变的基本规律。以上是针对单频方位向抖动进行的研究，实际上，这些规律在相对复杂的抖动模型中也可以进行推广。

3.3 复杂抖动模型与畸变的关系

在方位向抖动引起的图像畸变中，我们发现畸变和抖动参数之间存在三个定性关系：抖动频率决定虚像位置，抖动幅度决定虚像的能量，抖动相位决定虚像的相位。同时推导出了方位向单频抖动中，这三组参量之间的量化关系。而进一步的仿真和理论中推导发现，这三组参数关系在其他抖动模型中依然成立。这里所说的其他模型包括距离向抖动、倾斜平面内抖动、空间三维抖动以及多频率抖动等。不仅如此，定量的参量关系也基本相似，只不过抖动幅度与虚像幅度之间的函数关系会随抖动模型的不同而略有区别。

3.3.1 单频抖动角平面的旋转

此前讨论的抖动模型是在斜距平面内的，角误差的建模相对简单。而实际的雷达运行过程中，卫星的平面角抖动可能会发生在任何一个平面上，抖动方向既

可以是垂直于斜距平面，本文称为距离抖动，也可以是抖动平面与斜距平面有一定的夹角，本文称为倾斜抖动。本节将讨论角平面的旋转与抖动畸变之间的关系。

仍然是从简单模型开始分析，将上文研究的平面单频抖动旋转 90 度，然后仿真存在角误差的回波信号，并对回波信号进行成像处理。得到的实验结果如图 3-11 所示。

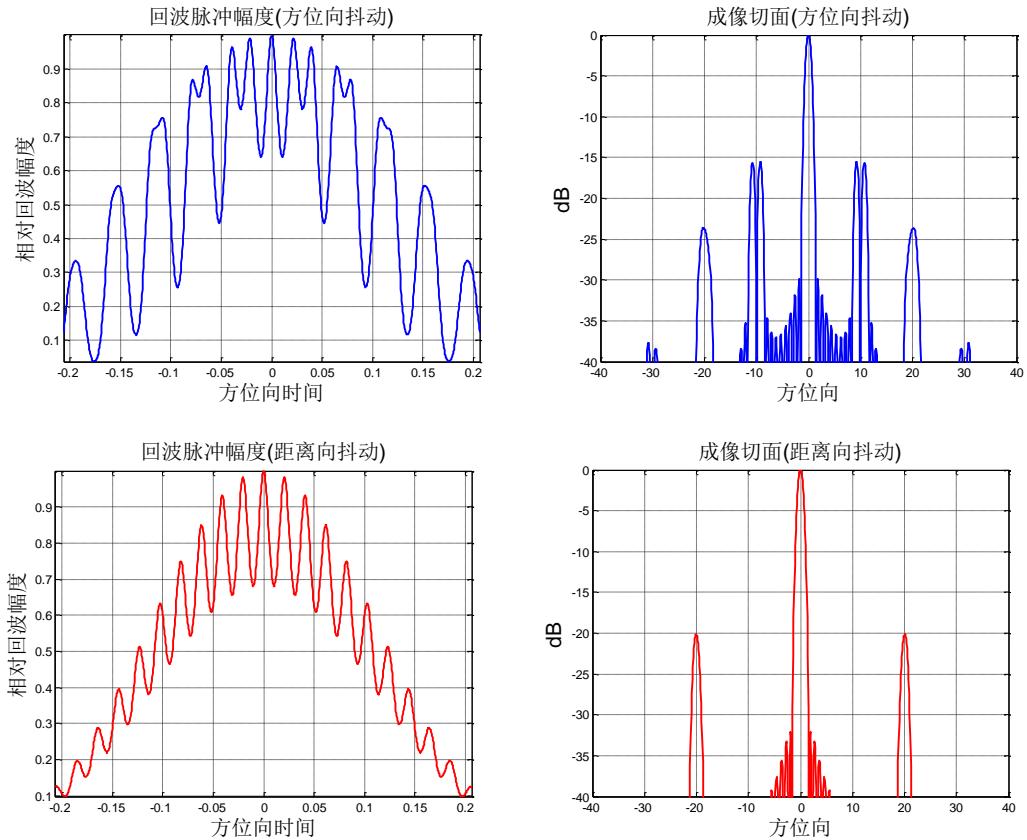


图 3-11 抖动方向改变对成像结果的影响

图 3-11 是抖动模型相同抖动方向不同的成像畸变对比，上面两幅图误差角在斜距平面内，左图是回波脉冲相对幅度的曲线，右图是点目标成像结果的方位向切面。下面两幅图也是脉冲幅度和成像结果，只不过误差角平面垂直于斜距平面。

当抖动方向不同的时候，脉冲的幅度历程差别较大，这导致了不同的成像结果。两种情况下抖动畸变结果最大的不同在于，距离向抖动导致的成像畸变中没有方位向中的距离理想成像最近的那对中心对称的虚像。第二对虚像的能量在距离向抖动中相对方位向的抖动略高。

距离向抖动与方位向抖动之间的差别可以从理论角度给出解释，当误差角角平面为斜距平面的时候，实际指向角，理想指向角和等效误差角之间的关系可以

写为: $\theta_r(\eta) = \phi(\eta) + \theta_{jitter}(\eta)$ 。但是距离向抖动中的误差角关系要相对复杂, 当抖动方向在距离向时, 对于成像区域中心线上的目标来说, 实际指向角度是大于或者等于理想指向角度的, 两者之间的关系为: $\cos \theta_r = \cos \phi \cdot \cos \theta_{jitter}$ 。近似

$$\text{得到 } \theta_r = \sqrt{1 - (\cos \phi \cdot \cos \theta_{jitter})^2} = \sqrt{\phi^2 + \theta_{jitter}^2 - \phi^2 \theta_{jitter}^2}$$

注意到前面的等效波束方向图展开式 $p_{re}^2[\theta_r] = \sum_{i \geq 0} d_i \cdot \theta_r^i$, 如果波束方向图是轴对称的 (大多数的轻敏 SAR 天线都满足这一条件), 那么就有:

$$d_i = 0, \text{ 若 } i \text{ 为奇数}, \text{ 这样 } p_{re}^2[\theta_r] = \sum_{i=2k} d_i \cdot \left(\sqrt{\phi^2 + \theta_{jitter}^2 - \phi^2 \theta_{jitter}^2} \right)^i \text{ 展开式中只有 } \phi$$

和 θ_{jitter} 的偶数次方, 而没有奇数次方。这就是抖动畸变成像中不存在奇数序列的虚像的原因。

对比距离向抖动与方位向抖动, 两者之间具有诸多相同之处, 比如说高低频的划分规律相同, 虚像的位置仍然是仅由频率决定, 幅度由抖动幅角决定, 抖动的相位也仅仅影响到虚像的相位。不仅定性分析的结论相似, 定量分析也具有很高的相似度, 比如说同频率的方位和距离向抖动引起虚像的位置和相位相同。不同之处在于, 抖动幅角和虚像幅度之间的关系表达式会有所不同, 幅度估计的量化表达式与天线的二维方向图等因素有关, 可以根据具体的系统模型来计算。

为了说明抖动与畸变之间的关系, 将上一节中所做的几组实验重复, 得到仿真结果如图 3-12 所示。在上面一副图中, 抖动频率变化, 其他参数保持不变, 虚像与主目标之间的距离随着抖动频率线性增加; 虚像的幅度有少许的变化, 不过这种变化是因为虚像与主成像的旁瓣之间的叠加而导致的。而在下面一副图中, 仿真输入中只是改变抖动的幅度, 而仿真结果显示, 虚像的幅度随之增加, 但是虚像的位置保持不变。

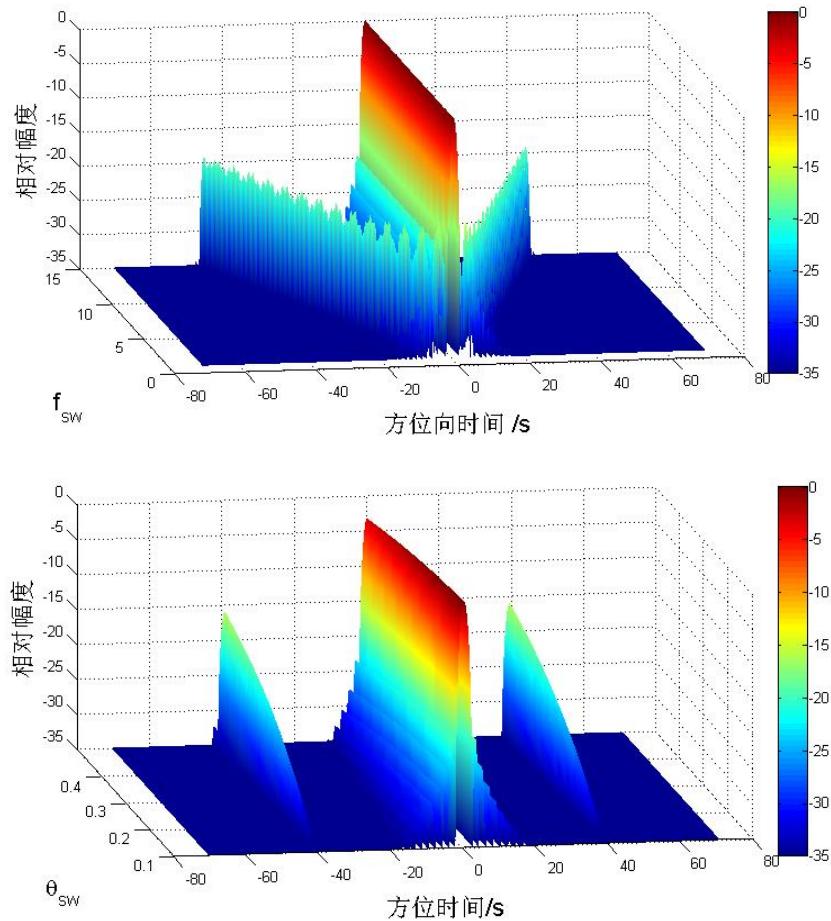
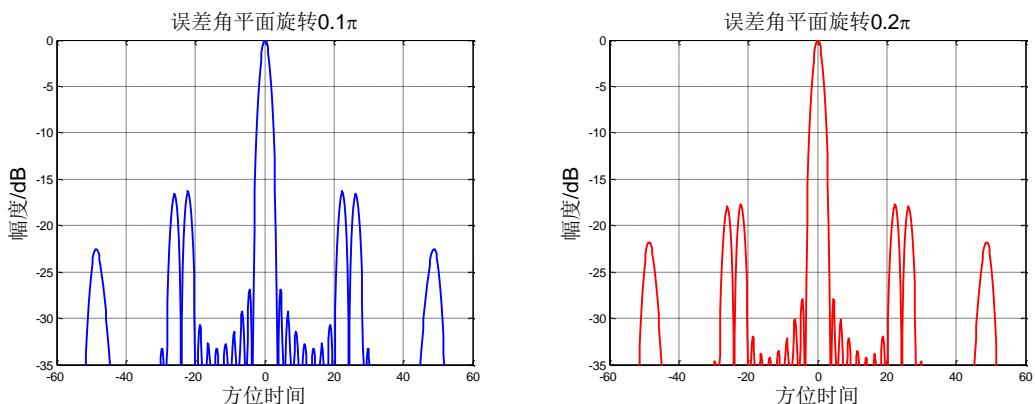


图 3-12 距离向抖动中虚像随抖动参数的变化

在分析了方位向抖动和距离向抖动两种特殊情况，可以将结论进一步地推广。如果不改变抖动的模型和参数，只是旋转抖动角平面，从方位向转到距离向的过程中，表现出来的畸变变化规律是第一虚像幅度不断降低，而第二虚像幅度不断升高，如图 3-13 所示。图中误差角平面从 0.1π 旋转到 0.4π 。因为抖动具有的对称性，所以通过四幅图再加上前面的方位向和距离向抖动，就可以看出抖动平面在 $0-2\pi$ 范围内转动的全部规律。



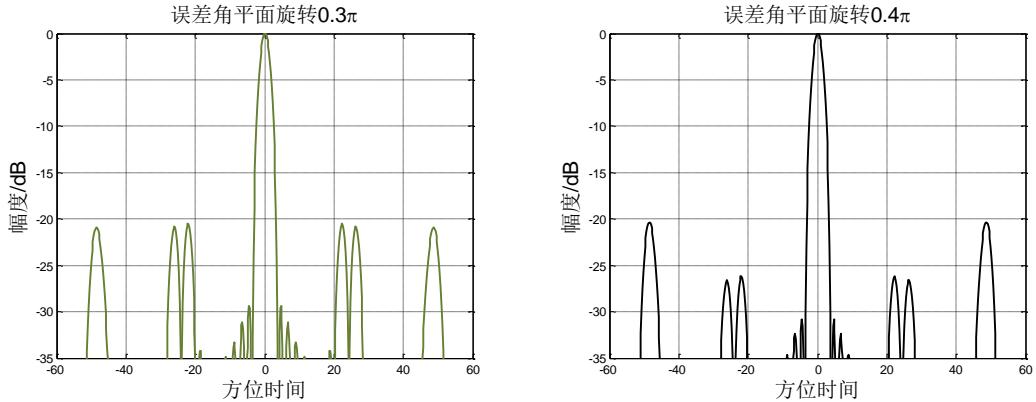


图 3-13 随误差角方向的转动的畸变变化情况

误差角平面从斜距平面转动到垂直斜距平面中，虚像幅度的变化规律如下：

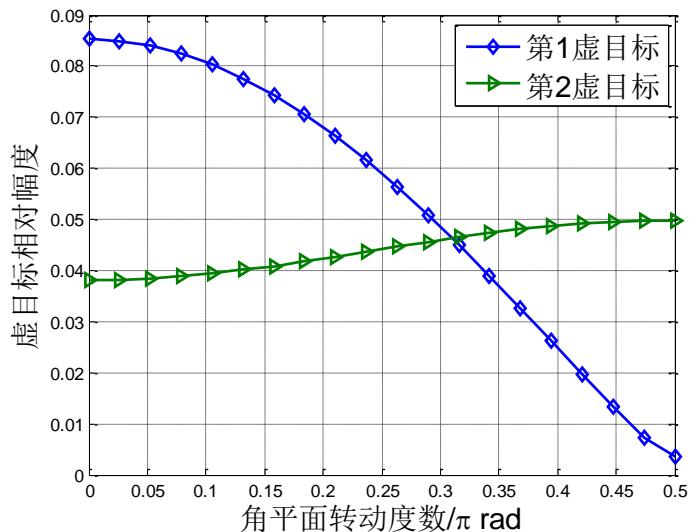


图 3-14 抖动产生的成像虚像随误差角平面的变化规律

另外，如图 3-14 所示，随着抖动角平面的转动，第一虚像的能量迅速下降，但第二虚像的能量提高并不多，所以这会导致点目标成像畸变结果中的 PSLR 不断下降($0 \sim 0.3\pi$)。从这个角度来看，对同样的抖动模型，如果主要能量集中在方位向，其导致的成像畸变结果要比能量集中在距离向的抖动导致的成像畸变更加恶劣。

本文已经给出了方位向和距离向抖动幅角与虚像幅度之间的变化规律的推导过程，倾斜平面的单频抖动，其推导方法与前面两种方法类似，只不过应为倾斜角的存在，推导的过程更加繁琐一些。在此不做进一步的讨论。

3.3.2 三维抖动模型的成像畸变

前文的抖动建模主要针对抖动能量在方位向的平面抖动或者近似平面抖动的情况，这只是一个抖动模型。实际情况中的抖动能量可能位于多个抖动平面内，合在一起是位于三维空间的抖动形式。

虽然抖动的形式和抖动建模更加复杂，但是基本规律和平面抖动有非常大的相似性。首先定性的分析结果都能够满足，而定量的参数关系也只是在幅度表达式上有所差别。

以一个椭圆锥面上的单频抖动为例，抖动的最大摆幅与频率仍然与上面的抖动模型中的数值相同，椭圆的偏心率设定为 0.6。仿真结果如图 3-15 所示，与前面的抖动成像畸变相比，最明显的相同之处是畸变结果仍然是位于理想成像左右的对称的虚像，而且虚像的位置与前面的抖动模型中虚像的位置也完全相同，也就是说也是由抖动的频率决定的。抖动的相位幅度等信息与平面抖动的信息有所不同，但是因为模型比较复杂，参数较多，直接的理论推导很难得到精确的结果。所以本文对一般性的椭圆抖动中虚像幅度与形状的量化不再做进一步的讨论。

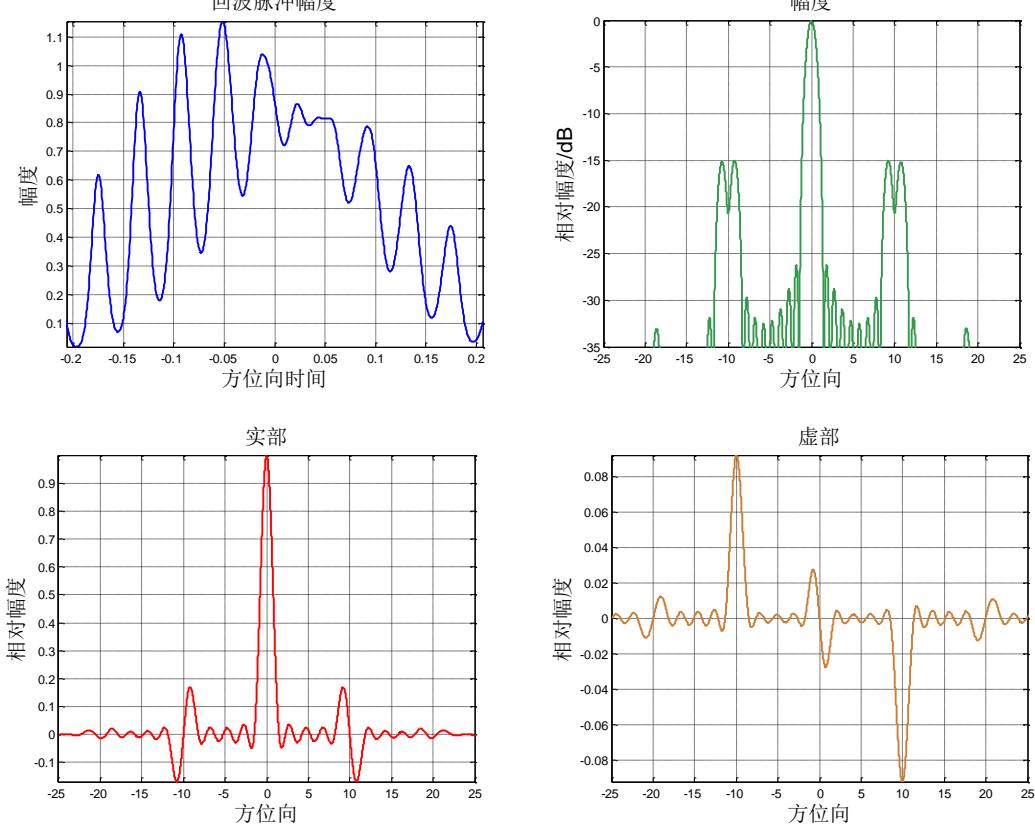


图 3-15 椭圆抖动的成像畸变举例

虽然抖动模型不同，所得到的虚像幅度有所不同，但是抖动与成像畸变之间的总体规律总结如下：

- 抖动频率决定虚像的位置，同样的抖动频率，即使抖动模型不同，最终的虚像位置也是相同的（垂直向抖动中奇数序列的虚像幅度为 0）。
- 抖动相位决定虚像的峰值相位，相位关系在不同的模型中会有所不同，不过都遵循线性变化规律
- 虚像的幅度仍然随着抖动幅度的增加而增加，两者之间的量化关系会随着抖动模型不同而存在区别。

不同抖动模型成像规律的相似点居多，差异主要存在于幅度量化关系，但是因为这不会对抖动补偿增加额外的难度，所以在此不做额外的论述。

3.3.3 多频率抖动的畸变分析

以上讨论的内容都是针对单个频率的情况，本节将给出多频抖动的分析方法。为了使推导的过程简单容易理解，仍然以方位向平面抖动为例。首先假设，抖动角误差的能量主要集中在方位向抖动 $\theta_{j,a}(\eta)$ ，有 $\theta_r(\eta) \approx \phi(\eta) \theta_{j,a}(\eta)$ 。简化后的一维方位向回波包络可以写作：

$$\omega_a(\eta) \approx p_{re}^2 \left[\frac{\phi(\eta) + \theta_{jitter}(\eta)}{\theta_b} \right] \quad (38)$$

使用格拉姆施密特方法将包络函数展开，得到： $p_{re}^2 [\theta_r] = \sum_{i \geq 0} d_i \cdot \theta_r^i$ ，因此近似之后的 RD 域方位向包络可以写为：

$$W_a = \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \sum_{m,n \geq 0, (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\frac{\theta_\varepsilon}{\theta_b} \right]^m \left[\frac{\phi}{\theta_b} \right]^n \quad (39)$$

$$\kappa_{m,n} = d_{m+n} \frac{(m+n)!}{m!n!}$$

表达式(33)中的一维等效偏差角可以近似为一组指数项的和的形式。抖动频率和方向往往和卫星结构有关，借助实验中得到的结论，可用根据傅立叶分析原理，对卫星的姿态角误差进行谐波分解，再借助一定的简化，最终可以得到一个简洁的模型，覆盖大多数的抖动能量：

$$\theta_\varepsilon = \sum_i \alpha_i \exp \left(2\pi \frac{f_i}{K_a} \cdot f_\eta + p_i \right) \quad (40)$$

式中, α_i , f_i , p_i 分别是第 i 个谐波分量的幅度, 频率和相位。因此,

误差角的 m 次方可以写成: $\left[\frac{\theta_e}{\theta_b} \right]^m = \sum_k \frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b^m} \exp \left(2\pi \frac{f_{m,k}}{K_a} \cdot f_\eta + p_{m,k} \right)$ 。因为抖动中存在两个以上频率, 则 $f_{m,k} = \sum n f_i$, 其中 n 为整数且 $\sum n = m$ 。将上面的简化式带入, 得到最终的点目标成像表达式为:

$$\begin{aligned} S(\eta) &= A_1 \cdot IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\frac{\theta_e}{\theta_b} \right]^m \left[\frac{\varphi}{\theta_b} \right]^n \right\} \\ &= A_1 \cdot IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \right\} \otimes IFT \left\{ \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\frac{\theta_e}{\theta_b} \right]^m \left[\frac{\varphi}{\theta_b} \right]^n \right\} \\ &= A_1 \cdot IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \right\} \\ &\quad \otimes IFT \left\{ \sum_{m,n \geq 0; (m+n \leq N)} \kappa_{m,n} \left[\sum_k \frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b^m} \exp \left(2\pi \frac{f_{m,k}}{K_a} \cdot f_\eta + p_{m,k} \right) \right]^m \left[\frac{B_d}{\theta_b} f_\eta \right]^n \right\} \end{aligned} \quad (41)$$

式中的 $IFT \left\{ \Pi \left(\frac{f_\eta}{B_d} \right) \right\}$ 得到 sinc 波峰, 指数项 $\exp \left(2\pi \frac{f_{m,k}}{K_a} \cdot f_\eta + p_{m,k} \right)$ 经过 IFT 之后得到一个偏置量, 与前面的 sinc 函数卷积, 起到平移的效果; 最后的 $\left[\frac{B_d}{\theta_b} f_\eta \right]^n$ 函数则是对 sinc 函数的求 n 次微分。利用合成孔径雷达的一些几何和信号关系, 可以对上式进一步化简得到:

$$S(\eta) = A_1 B_d \cdot \sum_{m,n} \kappa_{m,n} \left(\frac{1}{2\pi j} \right)^n \cdot \sum_k \left(\frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b} \right)^m e^{jp_{m,k}} s_n \left(\eta + f_{m,k} / K_a \right) \quad (42)$$

$$\text{式中, } s_n(\eta) = \frac{1}{B_d^{n-1}} \{ \text{sinc}[B_d(\eta)] \}^{[n]}$$

这是在伴随着抖动的情况下, 一个点目标的轻敏 SAR 系统成像结果。成像结果可以看作是多个波峰的叠加, 波峰的位置由 $f_{m,k} / K_a = (f_{m,k} \cdot T_a) / B_d$ 决定, 峰值大小由主要和 $\alpha_{m,k} / \theta_b$ 决定, 同时受到天线方向图的影响。

与单频相比, 多频抖动最大的不同点在于虚像峰值的位置, 如果单频抖动频率为 f_1 则虚像峰值只会出现在 $n \cdot f_1$; 而当抖动频率中同时包含 f_1 和 f_2 , 虚

像不仅出现在 $n \cdot f_1$ 和 $n \cdot f_2$ 位置，还会出现在 $nf_1 + mf_2$ 位置。举例如下：

设定两个抖动项：抖动 1: [6, 0.35, 0, 0]，抖动 2: [14, 0.25, 0, 0]。只包含一个抖动项的成像结果如图 3-16 中(a)图所示，虚像峰值位于 6, 12(6×2)和 18(6×3)。(b)图是只包含抖动 2 的情况，因为抖动幅角较低，只有一个虚像位于位置 14。(c)图是包含两个抖动项的情况，显然这里的成像畸变对频率输入来说是非线性的。主要的畸变峰值出现在了 6, 8(14-6), 12, 14, 20(14×6)和 26 (14+6×2) 这几个位置上。

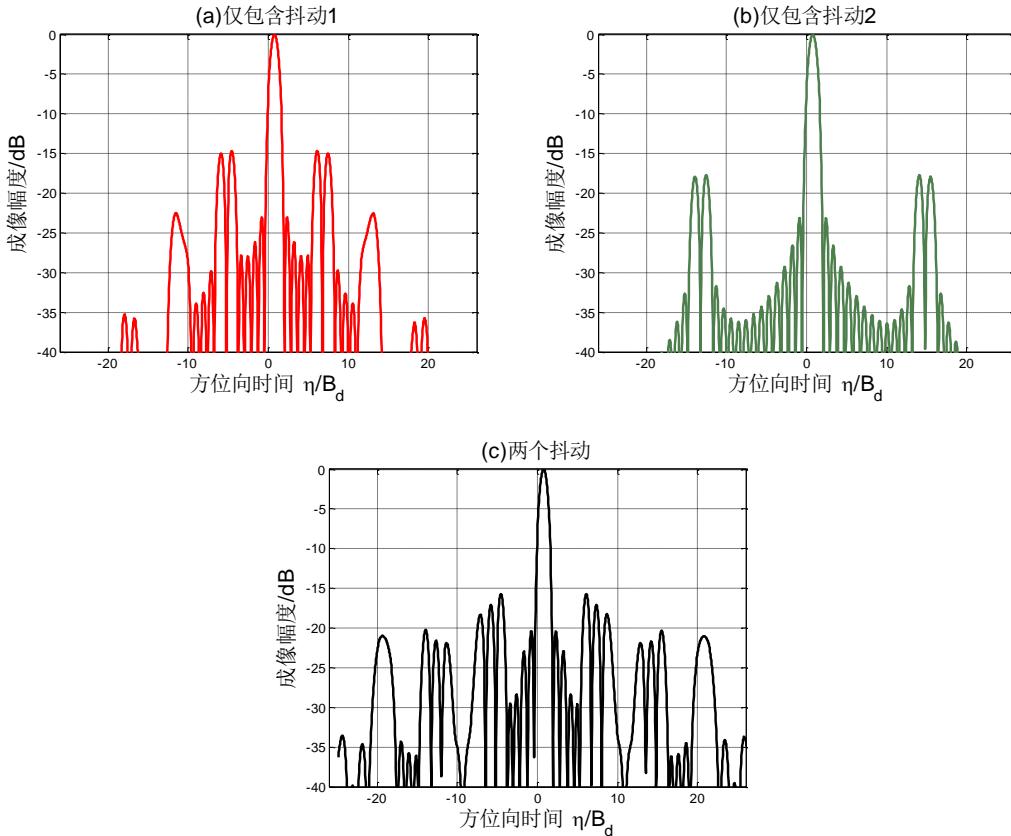


图 3-16 多频抖动与单频抖动的成像对比

总之，多频和单频相比，最大的区别在于峰值的位置不同，不过借助我们推导出来的公式(42)，还是比较容易就能得到抖动参量和畸变参量之间的量化关系。

3.4 低频抖动的畸变特征

低频抖动对成像的影响在过去的研宄中并没有给出充分的说明，但是在星载成像中，低频抖动能暈在总的抖动能暈中占比相当大。现有文献中报道的卫星天线抖动中占据能量较高的频率，在星载 SAR 系统中有大量的抖动能暈都属于低

频抖动的范畴。

高频抖动的畸变规律已经通过公式(42)给出解释，通过公式还得到了抖动参数与成像畸变之间的量化关系。但是公式(42)并不适合抖动能量主要为低频成分的情况，各种波峰之间以复杂的相位关系相互叠加，想要通过公式(42)直接得到可描述的结论就非常困难。因此，本文设计了一种新的方法用于分析低频抖动的成像畸变。

抖动与成像畸变之间的三种关系很好的解释了高频抖动中的成像特征，但是直接将这种成像理论运用到低频抖动的分析中却非常困难。低频抖动引起的虚像位置与主成像以及距离主成像最近的高能量旁瓣有较多的重叠，再加上虚像所具有的时变相位使得这种叠加关系变得更加复杂。这就需要用不同的视角去描述低频干扰的影响。

与高频抖动相比，低频抖动导致的回波幅度畸变有所不同，在照射时间内回波的幅度没有明显的起伏，特别是在抖动频率远小于高低频阈值的情况下。低频抖动中，对成像畸变贡献最大的是低频抖动导致的多普勒频移和照射时长变化。当抖动在方位向有分量的时候，回波幅度的畸变结果同时包括傅立叶频移和幅度畸变。图 3-17 的例子是抖动仅存在于方位向的情况。

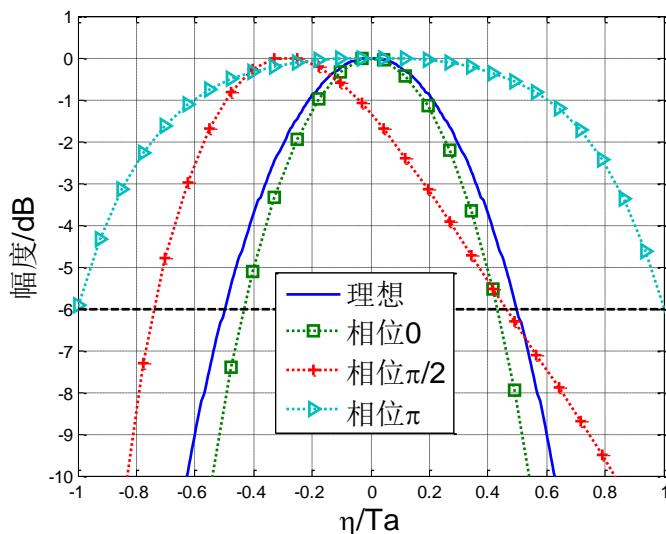


图 3-17 方位向低频抖动引起的回波脉冲幅度畸变

上图中的抖动参数为 $[0.3, 0.3, 0\sim\pi, 0]$ ，抖动相位分别为 $0, \pi/2$ 和 π ，另有无抖动的脉冲幅度包络作为对比。当抖动相位为 π ，也就是说天线位于理想位置并向卫星运行方向的后侧摆动，以此时刻为中心的点目标，其照射时间较长，

对应的结果是 3dB 宽度(收发双程所以这里是 6dB, 使用蓝色虚线标出)增加, 不过因为多普勒调频率的限制和方位向处理中的窗效应, 实际成像处理中只能用到 $-0.5T_a \sim 0.5T_a$ 之间的部分能量, 照射时间的延长对信噪比增加的贡献并不大, 只是相当于成像边缘部分能量提高了。相比之下, 当抖动相位为 0 的时候, 照射时间达到最小值, 照射时间减少对成像的影响会非常大。因为有效带宽减小, 脉冲压缩处理中能量累加不足, 会导致成像结果的幅度下降, 信噪比降低, 对成像的影响非常明显。

抖动相位 $\pi/2$ 的 3dB 照射时长与无抖动情况类似, 两者之间最大的区别在于多普勒中心频率的变化, 这可以等效为天线斜视。但是在成像处理中, 等效斜视角没有被考虑, 成像处理中用到的还是 $-0.5T_a \sim 0.5T_a$ 之间的回波能量, 所以虽然 3dB 照射时间没有缩短, 但是高能量回波没有被成像过程使用, 所以仍然会产生比较严重的幅度畸变。

除去 $\pi/2$ 的整数倍相位之外, 其他位置的目标点回波的同时存在照射时间变化与多普勒中心频率变化两种情况, 比如。在 $0 \sim \pi/2$ 的相位区间内, 照射时间逐渐延长, 等效斜视角逐渐增大。

而如果抖动的能量仅存在于距离向, 则回波畸变中不包含多普勒频移, 只有幅度的畸变, 如图 3-18 所示, 图中的仿真参数为 $[0.3, 0.35, 0 \sim \pi, \pi/2]$, 图中的蓝色, 红色, 黑色三条线分别对应相位 0, $\pi/2$ 和 π , 另外图中还加入理想回波脉冲幅度作为对比 (绿色虚像)。

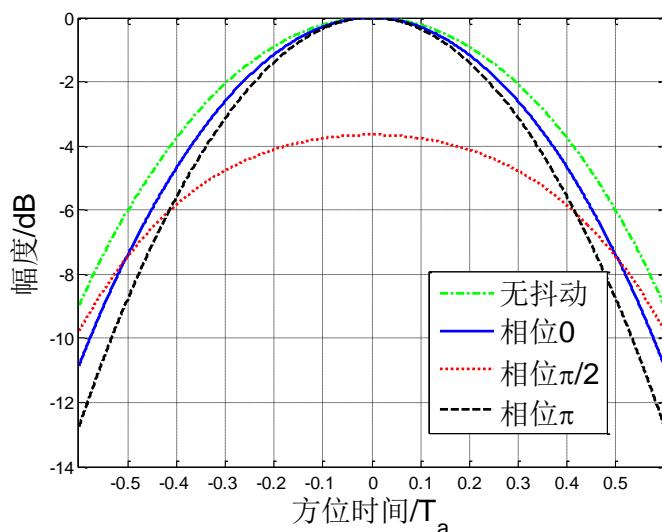


图 3-18 距离向低频抖动引起的回波脉冲幅度畸变

虽然在距离向抖动的情况下，回波脉冲幅度畸变中不包含多普勒频移，但是垂直向抖动的幅度畸变更加严重，主要是成像过程中波束中心线不经过点目标，最大回波幅度也比理想幅度有了高达-3.7dB 的损失（0.35 的相对抖动幅角）。

以上的抖动畸变规律也可以拓展到其他的抖动模型中，如果抖动在方位向幅角较小，则回波脉冲的幅度畸变是抖动对成像影响的主要形式；如果在方位向有明显的抖动能量，则抖动影响需要幅度畸变和多普勒偏移两方面进行描述。

幅度畸变很好理解，不管是中心幅度畸变（距离向抖动）还是边缘幅度畸变（方位向抖动）最终导致的结果都是点目标成像幅度的变化。而多普勒中心的偏移则会导致距离徙动校正的中心错位，以及方位匹配滤波器的中心频率偏离信号频谱能量峰值，两者都会降低目标主响应的压缩能量，而提高模糊区的能量，最终多普勒偏离误差会恶化信号模糊比和 SNR。

对比上面两组实验的成像结果发现，在方位向抖动的成像畸变中，随着抖动相位的不同，点目标成像的结果既有增加(相位 π)，也有下降(相位 0, $\pi/2$)。但是在距离向低频抖动中，不管是哪个相位，成像幅度都会下降，而且下降的最大幅度达到 3dB，高于方位向抖动的成像畸变。

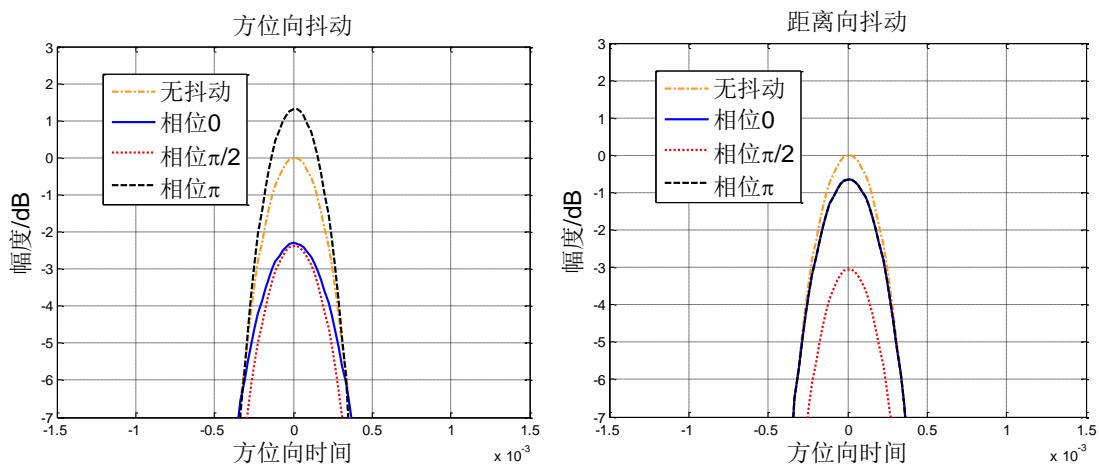


图 3-19 低频抖动的成像结果

因为低频抖动中不涉及虚像幅度，而且虚像一般也不会对主成像的位置造成影响，所以主要表现就是主成像幅度的上升或者下降。对其他的抖动模型，这个结论仍然成立，分析方法也和上面的两组实验类似。

3.5 系统抖动容限

在 SAR 卫星的姿控系统设计中，抖动容限是一个关键参数。如果成像系统

对卫星平台要求较高，在卫星设计中可能会要求使用非常高精度的姿态测量和控制设备，导致制造成本显著上升。即便如此，还是有可能会出现姿态系统无法满足载荷要求的情况。

通常的卫星方案设计中，抖动容限是直接由载荷设计方按照经验给出一个定值。但事实上，抖动容限是一个非常复杂的参数，与卫星结构，抖动模型等多个因素都有关系。本文给出了抖动导致畸变的理论，并给出了抖动参数与畸变参数的分析方法，只要将卫星抖动的特征模型带入，可以通过仿真得到更复杂，更精确的抖动容限，包含对抖动中各种参数的容许范围。在此基础上，就有可能通过卫星结构和控制算法的改进，用更低的成本获得更好的成像质量。

3.5.1 高频抖动容限

高频抖动造成的损失包括两个方面，单就点目标分析来说，高频抖动引起的畸变结果主要是虚像能量的提升和主成像能量的降低，对分辨率的影响较小。因此，在高频抖动导致成像畸变中，PSLR 和 ISLR 两个旁瓣性能是较好的评价指标。

仍然是从最简单的单频方位向抖动开始，通过一组仿真可以得到点目标成像的旁瓣性能随着相对抖动幅角和相对抖动频率的变化规律，仿真结果如图 3-20 所示，仿真中幅度变化范围为 0 到 0.35，频率变化范围为 2 到 10，相位设定为 0。

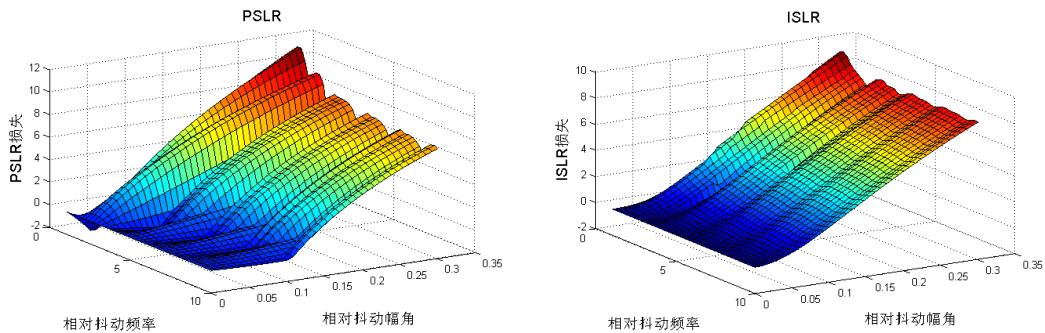


图 3-20 抖动参数与畸变性能损失之间的关系（零相位）

从图中看出，最显著的变化特征是：随着相对抖动幅角的增加，PSLR 和 ISLR 两个重要的旁瓣参数都迅速增大。除了幅角之外，频率也对旁瓣畸变有一定的贡献，这主要是因为频率改变了虚像的位置，导致虚像和原旁瓣不同的叠加关系导致的。除此之外，当相位不同的时候，损失曲面也会有一些变化。因此需要变换抖动相位，通过多次仿真更新损失最大值，最终得到旁瓣损失曲面如图 3-21 所

示

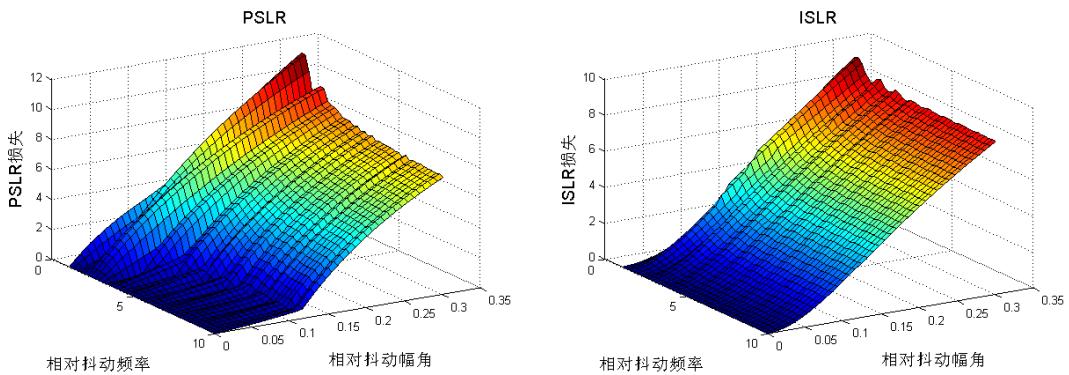


图 3-21 抖动参数与畸变性能损失之间的关系

假设成像系统可以容忍 2dB 的 PSLR 和 ISLR 损失, 用 2dB 平面截取图 3-21, 即可得到阈值曲线如图 3-22 所示。图中蓝色的区域是满足旁瓣参数的损失低于 2dB 的部分。在相对抖动频率 2.5 附近, 由于畸变能量与旁瓣的叠加, 旁瓣幅度较高, 因此此 PSLR 对抖动有较高的要求。

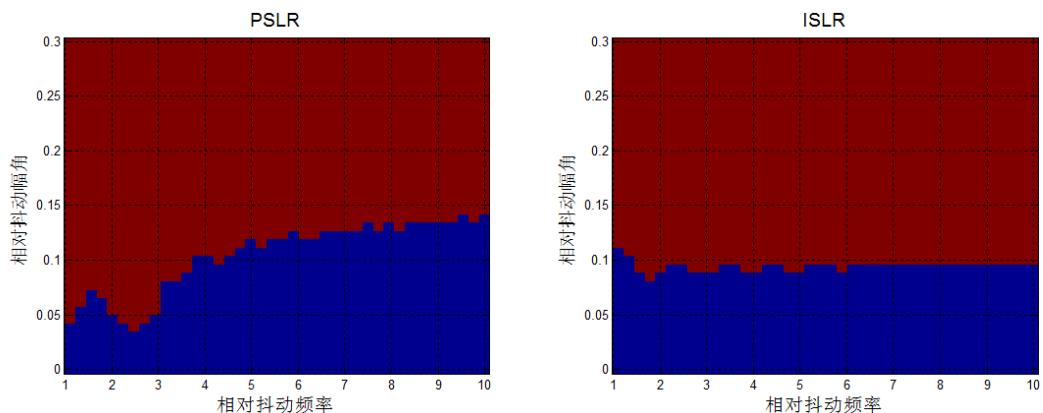


图 3-22 PSLR 和 ISLR 的阈值曲线

将图 3-22 中两条阈值曲线放在同一幅图中, 可以计算出旁瓣性能的 2dB 容限如图 3-23 中左图所示。用同样方法可以绘出 3dB 旁瓣性能损失的抖动容许范围, 如右图所示。

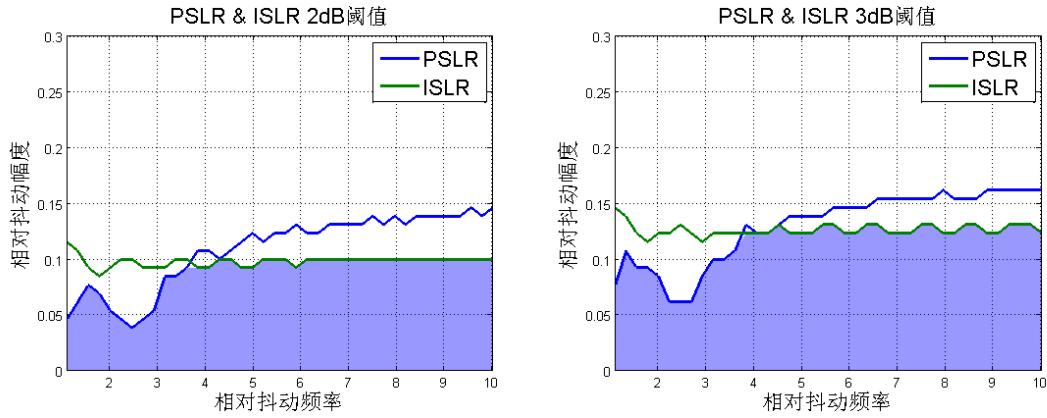
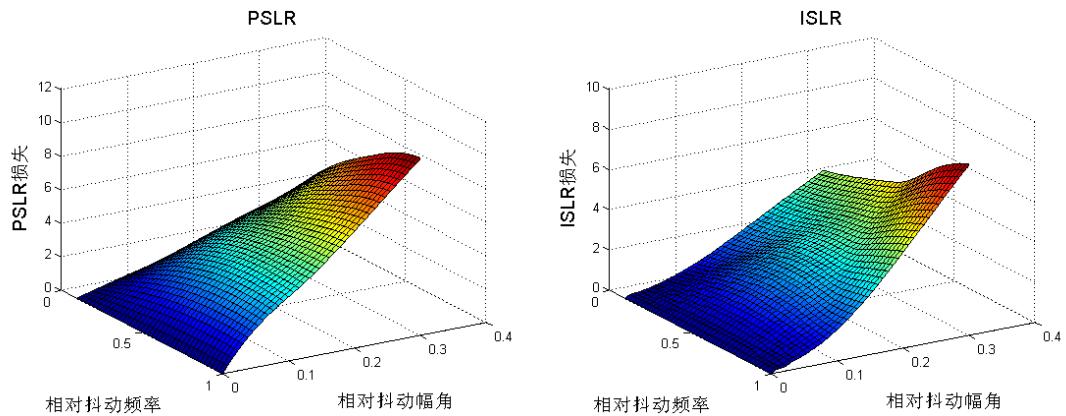


图 3-23 旁瓣性能的系统容限

3.5.2 低频抖动容限

低频抖动也会导致点目标成像的 PSLR 和 ISLR 两个参数的变化，但不像高频抖动那样是因为旁瓣能量提高。在低频抖动中，因为成像窗口内的幅度畸变导致的主瓣畸变才是抖动引起成像质量下降的重要原因。因此，除了两个旁瓣参数外，主瓣 3dB 宽度 IRW 和主瓣峰值幅度都需要作为低频抖动成像畸变的衡量指标。

和高频抖动类似，这里仍然以方位向单频抖动为例进行说明，其他的抖动模型可使用同样的分析方法。在区间 0.1 到 1 之间变化相对抖动频率，在 0 到 0.3 之间变化相对幅角，然后计算出每个抖动模型中，所有相位点上可能出现的最大 IRW，PSLR 和 ISLR 以及最小的成像峰值，将实验结果绘图如下



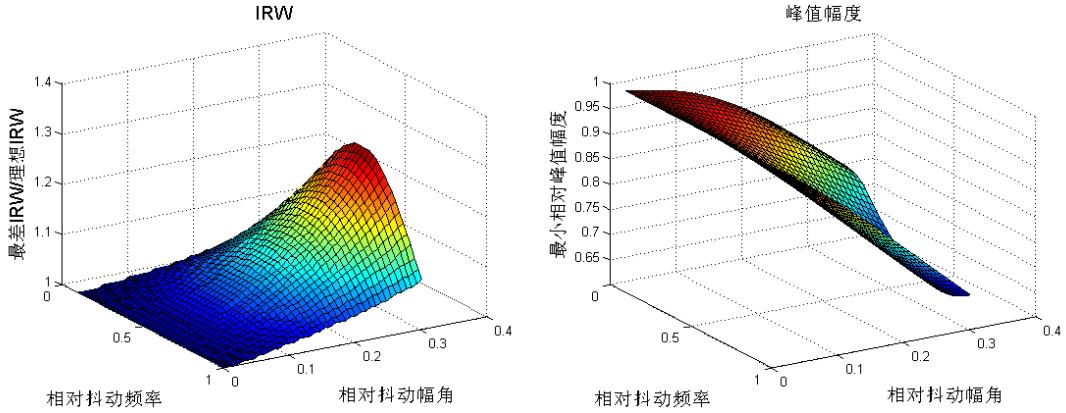


图 3-24 方位向低频抖动的成像畸变

与 PSLR 和 ISLR 指标相同，系统同样会给出最大可容忍的 IRW 损失和峰值幅度损失，将这些参数带入到试验数据中，即可得到最后的抖动容许区间。

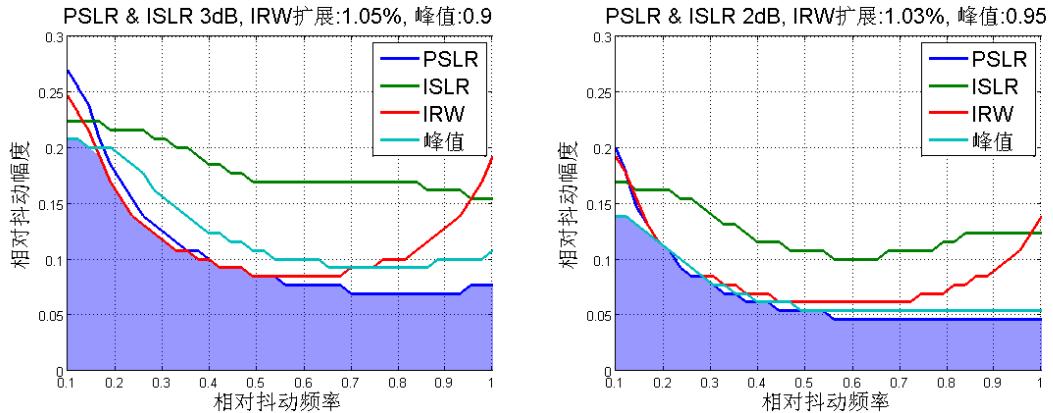


图 3-25 不同标准下的抖动许可范围

以上的抖动容限都是在直接进行成像处理的前提下得到的实验结果，如果将测得的卫星姿态数据用于运动补偿，通过后期处理的方法优化图像质量，则成像系统可以获得更高的抖动容限，关于这部分内容将在下一章中介绍。

3.6 本章小结

本章解释了抖动产生畸变的原因，排除抖动引起的相位畸变对成像的干扰，对单频抖动进行建模分析，得到点目标的成像畸变公式。在理论和仿真的基础上，发现了抖动参数与畸变参数之间存在的一些相关关系：抖动的频率决定了虚像的位置，抖动的幅度决定了虚像的能量，而抖动的相位决定了虚像的相位。在关系描述中定义了相对抖动频率和相对抖动幅度两个无量纲变量，从而获得了适用于

多种系统模型的通用的量化关系。通过仿真证明，本文的量化精度远高于现有文献中的畸变模型。

抖动幅度和畸变幅度之间的量化关系会随着抖动模型的不同而存在区别，本章对各种单频抖动模型做了推导和仿真分析，并将平面抖动的畸变规律推广到三维抖动。对与多频抖动模型，本文也给出了理论推导和仿真分析的方法。这样就将单频二维抖动的畸变规律推广，得到了通用抖动模型的点目标成像畸变规律。

本文首次给出了抖动高低频划分的理论推导，在低频抖动的理论研究中选择了新的研究视角，解释了畸变原因，并得到了更加简洁的畸变规律。

第四章 邻近点成像干扰及其时变性

在传统的成像研究中，SAR 系统被当作是一个线性时不变 (linear time invariant, LTI) 系统，仅研究冲击响应就足以判断系统特性。但是，抖动成像的畸变具有明显的时变性，不同位置处的点目标会产生不同的畸变相位。如果想要得到全面的系统响应特征，需要对冲击响应中时变项的叠加进行分析。

最初开始研究邻近点的成像干扰现象，是因为观察到高频抖动的成像结果中的明暗条纹，如图 4-1 所示。这种条纹垂直于方位向存在，而且条纹宽度与抖动的频率有明显的相关性，第二和第三幅图的参数分别为 $[8, 0.35, 0, 0]$ 和 $[4, 0.35, 0, 0]$ 。但是这种条纹产生的原因却难以用点目标成像畸变理论来解释，按照点目标的分析结果，抖动相位不会影响到点目标的成像幅度。考虑到畸变的时变性，本文决定对畸变与图像之间的成像干扰进行研究，而通过邻近点干扰现象的建模和理论推导，高频条带现象第一次得到理论解释。

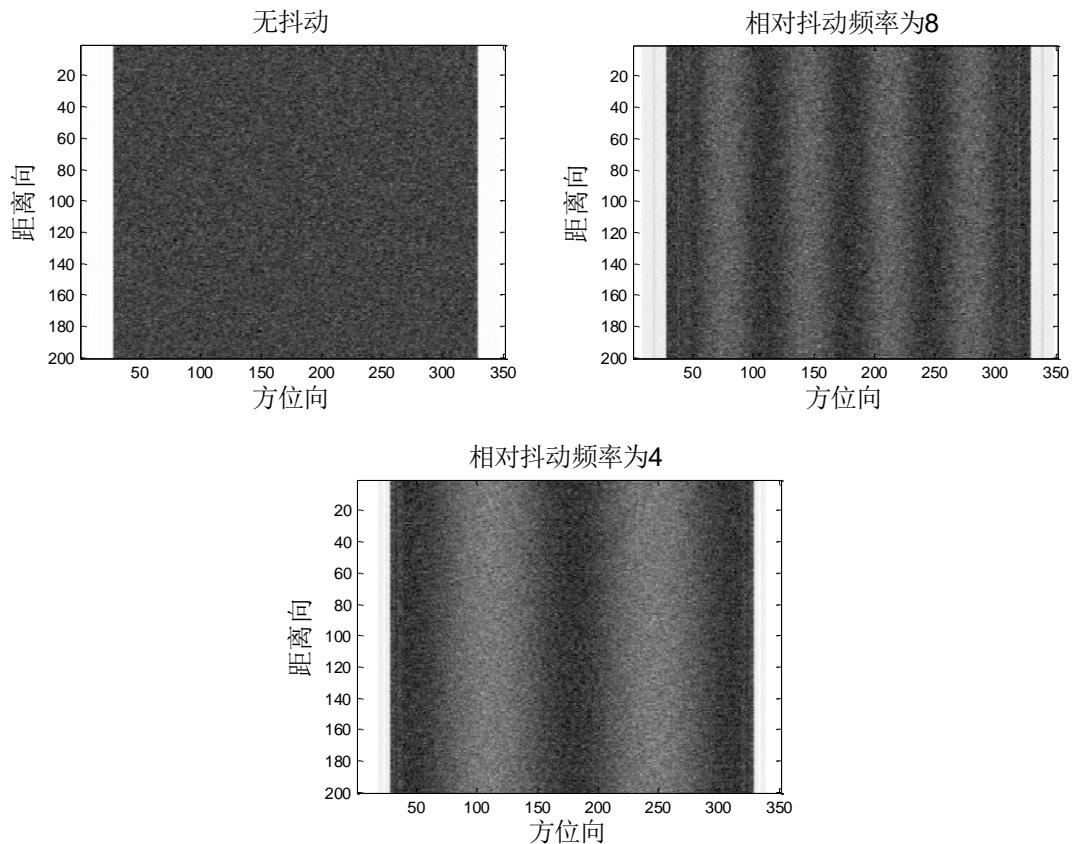


图 4-1 无抖动和高频抖动的区域成像对比

邻近点成像干扰是抖动畸变中的一种特殊现象。在理想 SAR 成像中，点目

标成像的能量集中在单个分辨率单元内，虽然也有旁瓣会干扰邻近点的成像，但是这种影响比较小而且主要集中一到两个分辨率单元内。但是，在抖动干扰下，特别是高频抖动干扰下的 SAR 成像，邻近点之间的干扰能量可以达到相当高的强度，而且影响范围可以达到 $n \cdot f_{sw} / K_a$ 远远超过分辨率单元的大小。另一方面，在理想成像中点目标成像的旁瓣相位是时不变的，而高频抖动畸变中的旁瓣相位具有时变特性，使得邻近点干扰成为轻敏 SAR 成像抖动补偿处理中不可忽视并且相当复杂的现象。

本节从微观特征和宏观特征两个角度给出邻近点干扰现象的分析，微观角度观察两个邻近点之间的干扰特征和变化，宏观角度分析干扰时变带来的宏观效应。通过理论推导将微观的点目标成像公式推广到区域目标的成像公式，通过邻近点成像干扰现象，成功解释了图像中沿方位向的成像起伏。最后给出抖动和幅度起伏之间的量化分析。

4.1 微观特征——邻近点干扰现象

邻近点干扰的微观特征是直接分析点目标的成像和相互之间的干扰，在这一节的仿真图中，会对相邻的多个点做成像处理，通过这种方式介绍邻近点干扰的时变特征，分析干扰的影响程度，并指出干扰源的坐标范围。

4.1.1 时变效应

在点目标高频抖动成像分析一节中曾经给出抖动相位和虚像相位之间的变化关系，随着点目标位置沿着方位向移动，点目标对应的抖动历程的中心相位也随之线性变换，而虚像相位与抖动相位之间也存在着线性关系。虚像相位沿着方位向的时变特征如图 4-2 所示。

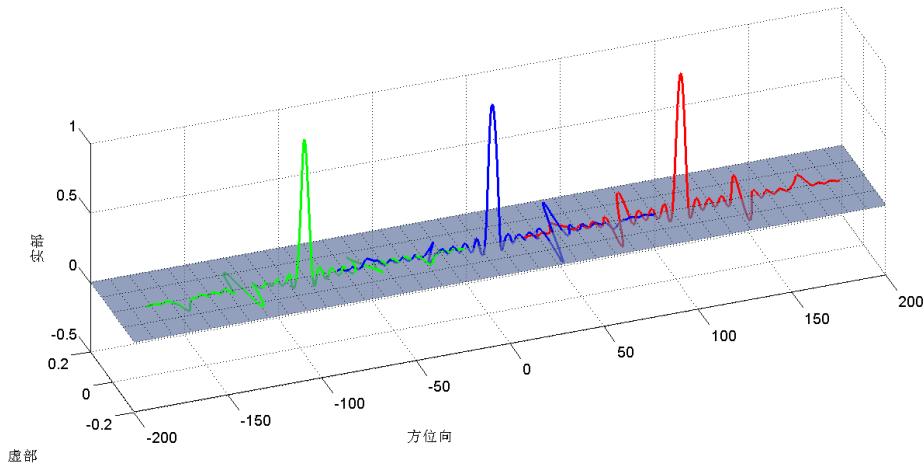


图 4-2 虚像相位的时变性

图中对相距 100m 的三个点目标分别做回波仿真和成像处理，然后绘制在一副图中（图中为了突出显示虚像，设定实部和虚部的单位长度为 1:2）。因为距离较远，彼此之间的干扰并不明显，但是如果恰好两个点之间的距离是虚像与主成像之间的距离，就会出现下图所示的情况。

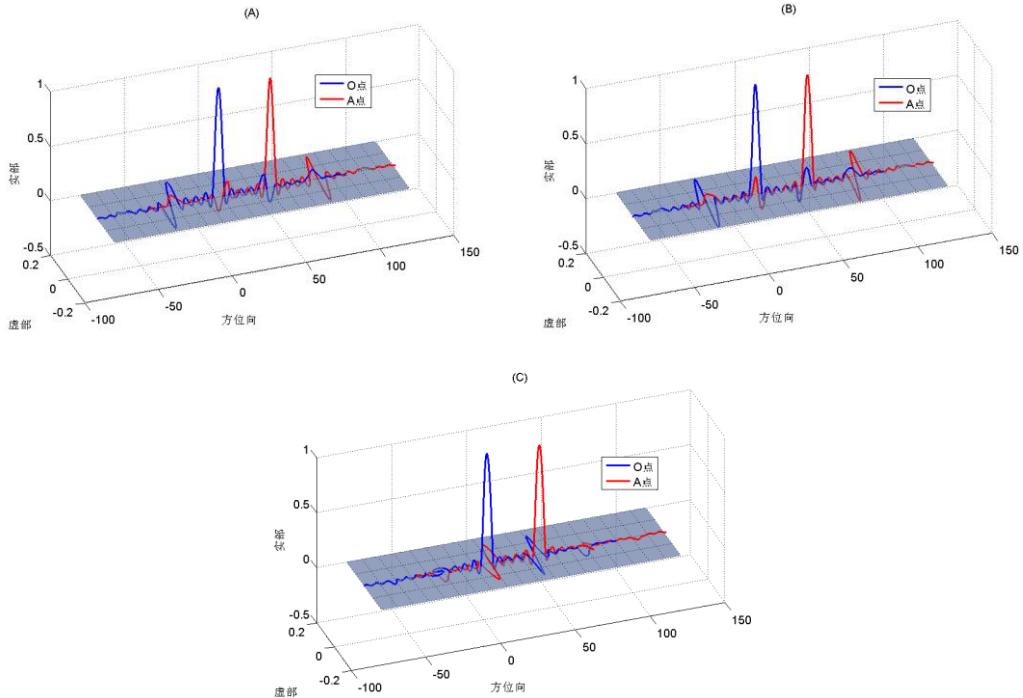


图 4-3 两点目标之间的成像干扰

图 4-3 中 O、A 两点的距离大小约为抖动产生的第一虚像与主成像之间的距

离 $\frac{f_{sw}}{K_a} V_r$ 的时候，就会产生第一虚像和主成像之间的相互干扰。这种干扰可能对

主成像幅度的减弱（图 A），也可能是增强（图 B），同时可能伴随着对主成像相位的影响（图 C）。在仿真中设定 O 点和 A 点的反射率相同。

4.1.2 干扰幅度

由于邻近点成像干扰的存在，照射区域内具有相同反射率的点目标，其成像结果可能会有较大差距。图 4-3 是对每个点的单独计算回波数据和成像过程，为了演示邻近干扰产生的原理，而实际上，OA 两点回波的收集和处理过程是同时进行的，得到的结果如图 4-4 所示，蓝色曲线对应图 4-3 中的 A 图，红色虚线对应 B 图，从中看出，因相位不同导致的图像幅度区别达到了 2.5 dB。

而这里还仅仅是考虑同反射率目标之间的比较，如果涉及到邻近的强反射率目标和弱目标之间的成像干扰，最终导致成像区域中相同反射率的两个点，在图像中的幅度却相差几倍，这会严重影响的图像的解读。

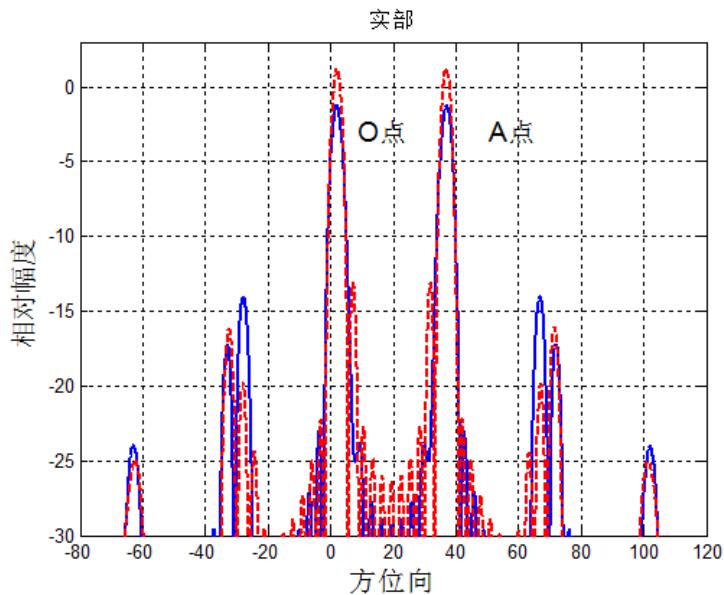


图 4-4 增强效应和减弱效应导致的幅度差

4.1.3 干扰区间

邻近点干扰的来源复杂，事实上，凡是在成像中被 O 点干扰的点目标，都会对 O 点的成像具有干扰作用。在上面讨论的模型中，包括 A 点在内，方位向坐

标相差 $n \cdot \frac{f_{sw}}{K_a} V_r$ ($n = -2, -1, 1, 2$) 左右的点，都会影响 O 点的最终成像。如图 4-5 所示，O 点两侧的四个点目标的成像曲线，都有某个虚像会叠加到 O 点的成像信息中去。

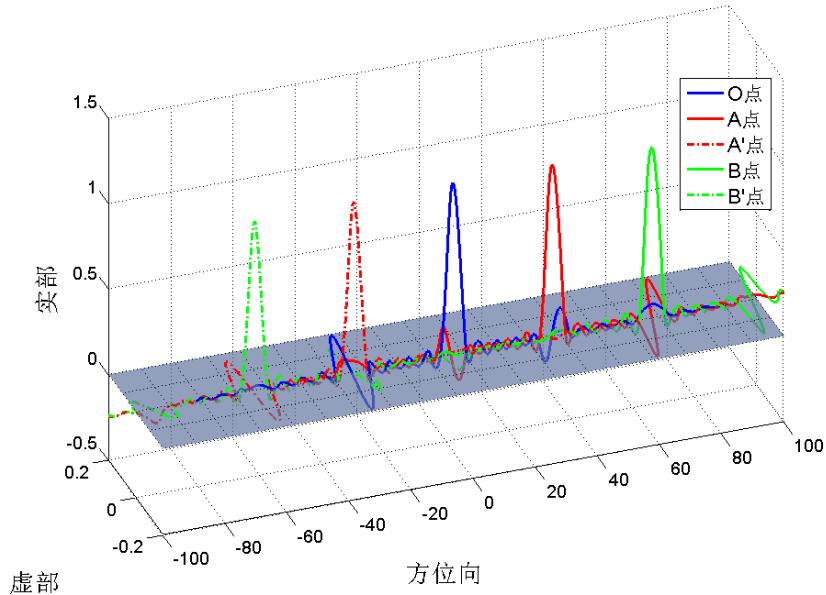


图 4-5 成像区域内的很多邻近点都会对成像结果产生影响

除了这四个点之外，影响到 O 点成像结果的还包括其左右一个分辨单元内的其他点目标。而如果相对抖动幅度更高，以至于第三虚像甚至第四虚像的能量不可忽略，那么更远的点目标也会成为 O 点成像的干扰源。也正是因为干扰源的广泛性，这导致邻近点成像干扰的分析难度进一步增加。

4.2 宏观特征——区域成像中的明暗条带

垂直于方位向的明暗相间的条带是天线抖动导致的一种成像畸变结果，而且不论抖动是低频还是高频。低频抖动导致沿方位向的幅度起伏，这点很好理解，因为对应不同的抖动相位，天线对目标的照射时间不同，经过相干积分得到的峰值幅度必然会有周期性的变化。但是在高频抖动中，这一点就很难得到合理的解释，因为在上一届的分析中我们知道，抖动相位对点目标成像的峰值幅度是没有影响的。

这一问题在现有文献中都没有得到合理的解释，本文经过仿真实验和理论推导最终得到结论：邻近点干扰导致了图像中的明暗条带。通过引入点目标成像公

式，本文从理论上证明了这一结论。

高频抖动的成像结果中存在垂直于方位向的明暗条纹，这种现象在成像区域中反射率变化较小的情况下尤其明显，比如大片的森林、草地、农田、荒漠等，如图 4-1 所示。而且，在高对比度的场景中，不仅存在明暗条纹，还会造成其他图像畸变，影响图像识别。

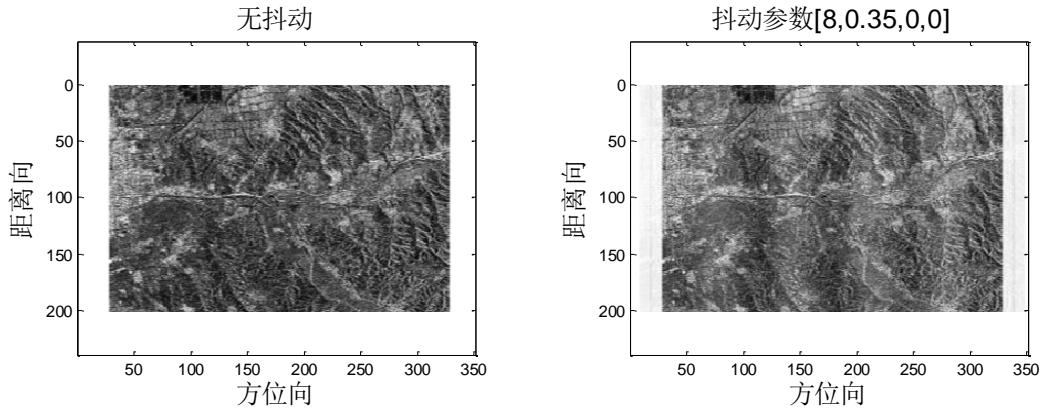


图 4-6 同一区域的成像对比，无抖动和抖动

图 4-6 就是一个更接近于实际成像的抖动成像实例，左图中是无抖动的成像结果，右图中是包含了抖动的回波的成像处理结果。右图中的抖动参数为 $[8, 0.35, 0, 0]$ 。右图与左图相比，除了细节上的损失之外，还有明暗条纹的叠加。

在上一节已经得到了一个比较精确的抖动成像公式（公式(42)），将这个公式带入到邻近点目标成像干扰中，研究邻近点成像之间的干扰情况，本文得到了成像中的幅度抖动与抖动参数之间的关系。并给出了邻近点目标时变的成像干扰导致了宏观上的幅度起伏现象的理论依据。

4.3 包含邻近点干扰的成像建模及条纹成因解释

存在邻近点成像干扰的情况下，图像中任意一点 $\eta = \eta_0$ 位置的图像表达式推导如下：假设在目标点 $\eta = \eta_0$ 的邻域有反射率为 $\sigma(\eta_1)$ 的目标，该目标的旁瓣在目标位置处的干扰为：

$$I_1(\eta_0) = A_i \sigma(\eta_1) B_d \sum_{m,n} \kappa_{m,n} \left(\frac{1}{2\pi j} \right)^n \sum_k \left(\frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b} \right)^m e^{j(2\pi f_{m,k} \eta_1 + p_{m,k})} s_n \left(\eta_0 - \eta_1 + \frac{T_a f_{m,k}}{B_d} \right) \quad (43)$$

将邻域内所有这样的 η_1 点的干扰信息以及 $\eta = \eta_0$ 处的主瓣成像结果累加在

一起，最终得到：

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} A_i I_1(\eta_0) d\eta_1 \quad (44)$$

这就是 $\eta = \eta_0$ 位置的最终成像结果。等式(44)没办法通过直接求解得到可理解的通式，但是在特殊的情况下，可以借助一些简化得到近似的邻点干扰分析。假设 η_0 邻域内点目标的反射率变化较小，(成像区域中存在大面积植被或平坦地表的情况下更加明显)，可以将 $\sigma(\eta_1)$ 视为常数，从而得到：

$$\begin{aligned} I_0 &= \sum_{m,n} K_{m,n} \cdot (-1)^n \left(\frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b} \right)^m e^{jp_{m,k}} \cdot \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} B_d \left(\frac{1}{2\pi j} \right)^n s_n(\eta_1 - \eta_0 - f_{m,k} / K_a) e^{-j2\pi(-f_{m,k})\eta_1} d\eta_1 \quad (45) \\ &= \sum_{m,n} K_{m,n} \cdot \left(\frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b} \right)^m \cdot \sum_k \left(\frac{f_{m,k}}{B_d} \right)^n \cdot \Pi \left(\frac{f_{m,k}}{B_d} \right) e^{j \left(2\pi \frac{f_{m,k}^2}{K_a} + 2\pi f_{m,k} \eta_0 + p_{m,k} \right)} \end{aligned}$$

上面的等式还可以继续简化，利用轻敏 SAR 成像的一些特性。比如在 SAR 成像中，多普勒频率是比较高的，相比之下，抖动频率要低了几个数量级，也就是说 $f_{m,k} / B_d$ 非常小， $(f_{m,k} / B_d)^n$ 项当 $n > 0$ 的时候可以直接忽略。同样， $f_{m,k}^2 / K_a$ 也非常小，相位项的影响也可以忽略掉。天线方向图一般为轴对称的偶函数，所以当 i 为奇数的时候， $d_i = 0$ 。利用以上结论得到简化之后的结果为：

$$I_0 = \sum_m d_m \frac{m!}{2^m \left(\frac{m-h}{2} \right)! \left(\frac{m+h}{2} \right)!} \cdot \left(\frac{\alpha_{m,k}}{\theta_b} \right)^m \cdot e^{j(2\pi f_{m,k} \eta_0 + p_{m,k})} \quad (46)$$

从公式(46)中可以看出，抖动导致的成像畸变具有方位向的时变性；天线存在抖动的情况下，对一片区域的成像会叠加一系列的亮度变化，亮度变化的大小由天线的抖动幅度和天线方向图共同决定，亮度变化的频率与天线抖动的频率有关。

公式在高频和低频抖动的成像结果中都有效。在推导公式(46)的时候我们引入了平坦假设，但是事实上，除了在平坦区域有明暗相间的条纹之外，在一些相对复杂的成像区域，成像强度也会呈现周期性的变化，这点在第五章的仿真图中可以看到。除了区域成像之外，在高频抖动的运动补偿中也应该要考虑到邻点干

扰效应的影响。

4.4 单频抖动中抖动参数与区域成像畸变

因为抖动引起的畸变只存在于方位向，所以在研究抖动对区域成像的干扰的时候，可以将模型简化为对沿方位向的线目标的研究。上面又提到，邻近点干扰的一个重要特征：沿距离向的明暗条纹，在反射率平坦的区域最为明显。所以进一步简化研究对象为恒反射率线目标。

与前面的点目标抖动畸变研究相似，抖动模型不同，畸变规律和参数关系也有一些的区别，但是分析方法类似。本节以平面单频抖动为例，给出区域成像畸变规律的分析方法。

变化抖动的频率，幅度和相位，对线目标做成像仿真。仿真参数分别设定为：

(a)图: [2, 0.35, 0, 0]; [6, 0.35, 0, 0]; (b)图: [4, 0.15, 0, 0]; [4, 0.35, 0, 0]; (c)图: [4, 0.3, 0, 0]; [4, 0.3, pi/3, 0] ; [4, 0.3, 2*pi/3, 0]

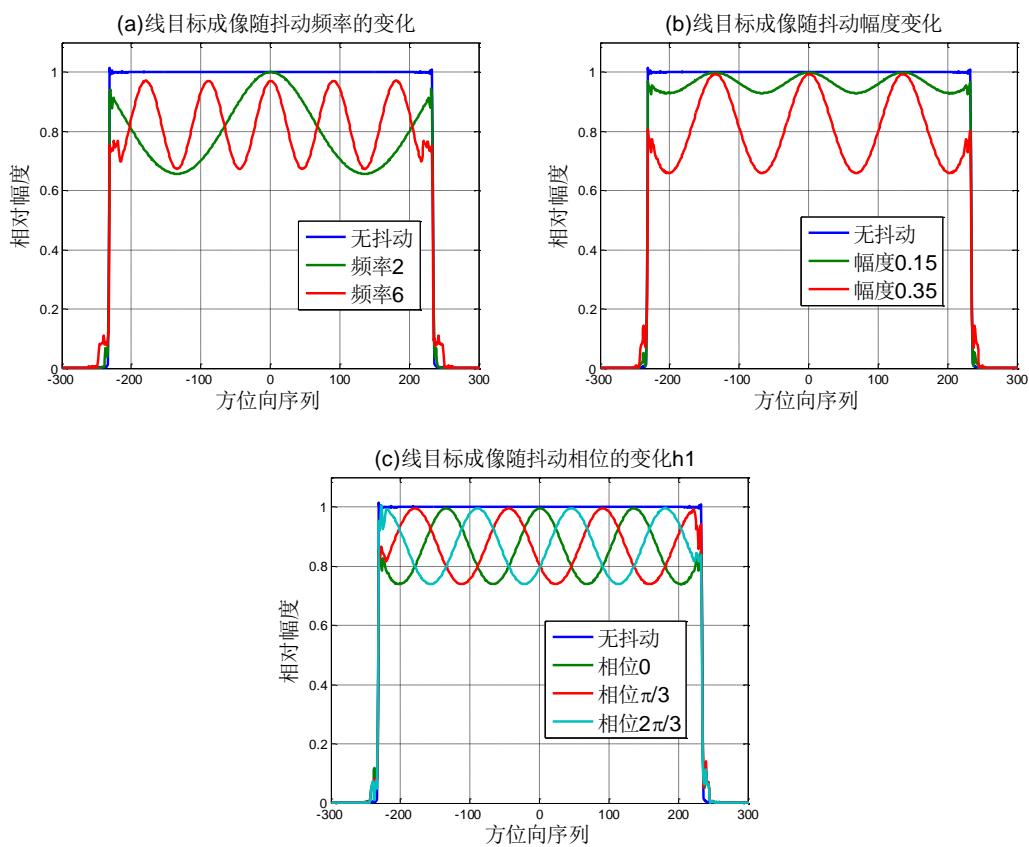


图 4-7 线目标成像随频率、幅角、相位三个参量的变化规律

从图中可以发现参量变化的三个规律：首先，条带的宽度是和抖动频率成反

比的，这个在前面的实验中已经看到，而且也经过理论推导的论证。其次，抖动的幅角越大，波动最大值和最小值之间的差距也就越大，同时幅角与波形位置、条带宽度等没有关系。最后，波形的位置是由抖动相位决定的，波形随抖动相位改变的周期是 π ，也就是说条带周期是抖动周期的一半，这个结论也可以从公式(46)中得到。

需要增加说明一点，在相对频率为 10 左右的位置，抖动频率对波动的最大最小值也会有影响，如图 4-8 所示，仿真抖动频率从 2 到 15 之间变化，抖动幅度在 0 到 0.45 之间变化。在此过程中，极大值在多数情况下相对幅度为 1，但是在频率接近 10 的地方，最大值幅度会下降。相应的，波动的极小值也会上升，也就是说波动的动态范围减小，但是这种变化的原因尚不明确。

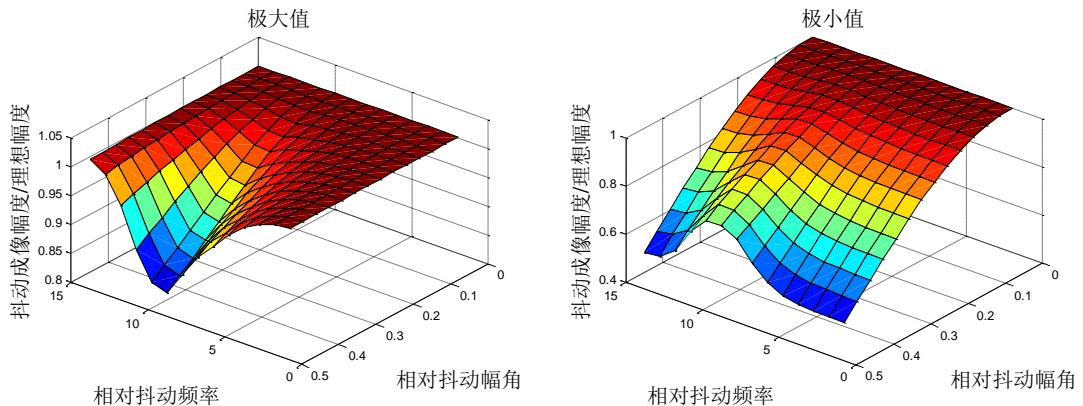


图 4-8 在特殊的抖动频率下，频率的变化也会影响到畸变幅度

通过其他的实验发现，单频抖动中改变抖动模型，线目标仿真的变化规律比较相似，在多频抖动中，成像规律相对复杂，但是可以用同样的方法进行分析。本文也给出了相应的仿真程序，可用于相关实验。

在低频抖动模型下，恒反射率线目标的成像规律就相对简单。同样变化方位向低频抖动的频率和幅角，得到的极大极小值的变化情况如图 x 所示。极大值可以看作是保持在与理想幅度相同，而极小值随着抖动幅度的增加而下降。

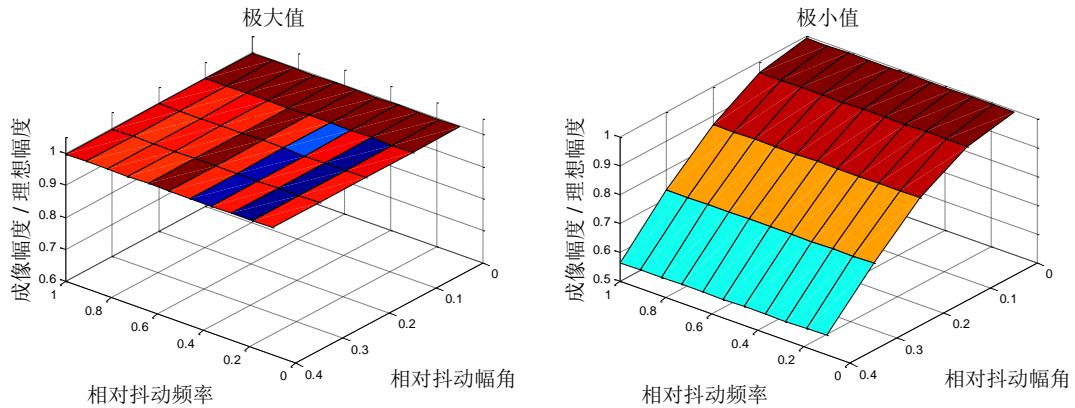


图 4-9 低频抖动参数与区域目标成像波动之间的关系

前文曾经对点目标低频抖动成像畸变的进行讨论，在方位向抖动中，某些抖动相位导致的成像的幅度高于理想情况，而在线目标仿真中却不存在这种现象，其成因同样是邻近点不同相位的畸变能量的叠加。

4.5 本章小结

在以往的抖动畸变研究中，抖动畸变的时变性往往被忽视，本文首次在畸变成像理论中加入了邻近点干扰效应，弥补了这一缺陷，从而得到了完备的系统响应表达式。通过邻近点干扰的推导，本文首次解释了条纹成因，然后通过大量仿真得到了抖动与条带畸变之间的关系。

第五章 高频抖动的补偿方案设计

通过优化结构和姿态控制等设计，先进卫星平台在大多数时间都能够将波束抖动控制在较低的水平。但是在长期的运行过程中，成像过程中的波束指向抖动难以完全避免。通过在成像处理的过程中加入抖动补偿操作，可以在地面的成像处理过程中弥补图像损失，提高图像质量。

如前所述，高低频的抖动产生不同类型的成像畸变，有着不同的畸变机理。因此，本文设计了两种不同的算法，针对这两种畸变类型分别做补偿处理。抖动高低频的划分以合成孔径时间的倒数 $1/T_a$ 为界，阈值与信号载频以及方位向分辨率等因素具有较大的相关性。对本文的仿真模型，抖动阈值是 2.6Hz，对于其他常见的轻敏 SAR 模型，这个阈值一般位于 1Hz~3Hz 之间。本章介绍高频抖动的补偿，低频将在下一章节说明。

现有的合成孔径雷达运动高频抖动补偿算法大多是针对相位误差进行，并不适合轻敏 SAR 卫星的抖动模型。本文提出一种基于包络畸变校正的补偿算法，经验证具有更好的补偿效果。

5.1 抖动补偿的输入

5.1.1 抖动数据源

星上通常搭载了高精度的姿态传感器，比如太阳敏感器、星敏感器、红外地平仪、磁强计，惯性导航单元 (IMU) 等，一些高分辨率卫星系统甚至会直接把小型的高精度姿态传感器安装在成像传感器位置，从而获得更高的姿态精度。以上各种传感器获得的数据通过地面的处理，可以得到每个时刻的卫星姿态估计。通过姿态数据计算出实时的天线指向数据，可以有效补偿波束抖动导致的成像畸变。

IMU 基于陀螺仪和加速度计设计制造，可以连续自主输出载机速度、加速度、以及姿态等运动信息，输出数据更新速度较快，精度较高，不易受外界干扰，可靠性高。为了提高天线相位中心(APC)处的测量精度，有时候还会把运动传感器安装在尽量靠近天线的位置。目前国外许多机载 SAR 系统中的运动补偿都是基于 IMU/GPS 组合系统来实现的，如意大利的 ALS-SAR 系统、德国的 PAMIR 系

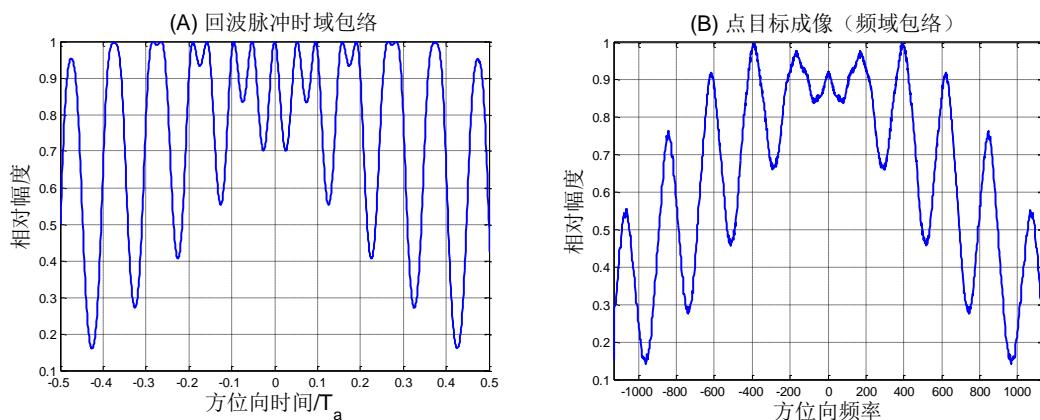
统和美国的 Lynx 系统等。对低频抖动分量的测量，现有的技术已经能够达到较高的精度；但是如果要测量得到高频抖动分量的高精度数据，需要将具有较高采样频率的加速度计和陀螺仪等传感器的采集数据进行处理，即可得到 100Hz 以下的天线指向角数据。

除此之外，文献中还有介绍通过回波数据来估计卫星的姿态，可以用作传感器数据失效等情况下的替补方案^[137]。

5.2 高频补偿算法的基本原理

从点目标成像来看，高频抖动产生的主要畸变结果是位于主成像两侧对称位置的多组虚像，这些虚像的相位不同，其存在会导致图像模糊、强目标掩盖弱目标等现象，影响成像质量。因此，运动补偿算法设计的最主要目标是抑制虚像的能量，将其限制在一个可以接受的范围内。不过抖动畸变所具备的时变效应给抖动补偿也带来不小的麻烦，会导致补偿之后的图像残差，以及非常大的运算消耗。

高频抖动导致成对虚像畸变的原理可以概述为：波束抖动引起的角误差导致回波脉冲幅度的变化，由于 SAR 信号的线调频特性，这种时域的幅度起伏引起了相似的多普勒域包络畸变，经过最终的逆傅立叶变换，导致了成像结果中成对出现的虚像。以上整个过程可以用图像来表示。



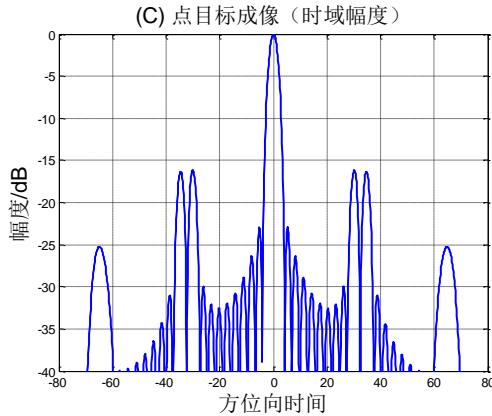


图 5-1 高频抖动畸变成因示意图

如图 5-1 所示是高频畸变成因示意图，仿真中伴随着波束抖动，卫星天线对地面某点目标收集回波信号并进行成像处理；抖动参数设定为：相对频率 5，相对幅度 0.3，相位 0。图(A)是点目标回波的脉冲幅度曲线；经过距离向脉冲压缩、距离单元徙动校正、方位向脉冲压缩等一系列操作得到点目标成像的多普勒域信号，图(B)所示为频域的包络。(A)、(B)两图具有相似的形状，只不过 B 图中两侧幅度较低，这是在成像处理中加 Kaiser 窗的结果。将(B)中的曲线做逆傅立叶变换，得到(C)图也就是最终的成像结果，零时刻附近为主成像，左右还有幅度较高的畸变能量。如果可以设计一个补偿滤波器，校正图(A)或(B)中的包络抖动，得到相对理想的平滑包络，就可以消除成像结果中的成对虚像，提高系统的成像质量。

利用星上的各种姿态测量传感器提供的各种姿态测量数据，可以构建合适的补偿滤波器，从而达到校正抖动畸变的目的。姿态测量值经过拟合之后，可以计算得到卫星波束在每个时刻的指向向量 \overrightarrow{OP} ；同时，使用卫星的位置数据可以计算出每个时刻从天线相位中心点 P 到地面某点目标 A 的指向向量 \overrightarrow{PA} 。这样就可以计算两向量之间的空间角度和方向，也就是点目标在天线波束中的位置，并带入卫星天线的方向图函数，求得回波幅度序列的估计值 $\tilde{\omega}(\eta, A)$ 。利用 $\tilde{\omega}$ 构建补偿滤波器就可以校正图 5-1 (A)或 (B)中的包络畸变。总体的算法实现流程如图 5-2 所示。

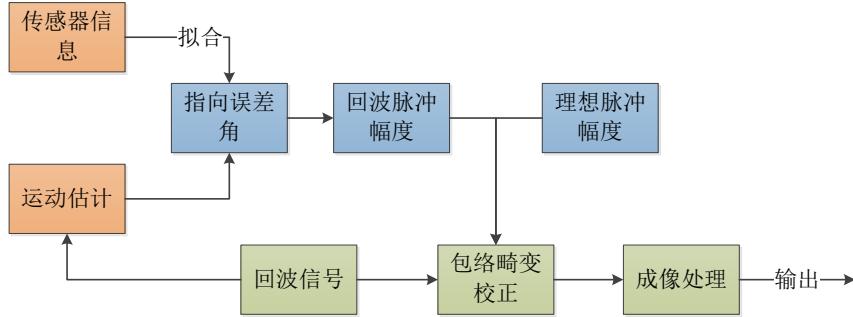


图 5-2 高频抖动补偿原理图

抖动畸变的时变性使得补偿方案的实现变得非常困难。首先，具有不同坐标位置的点目标在波束照射时间内有不同的回波幅度历程，若要获得精确的补偿结果，则需要对成像区域内每个坐标点分别进行成像处理和抖动补偿处理，这使得抖动补偿的计算量变得非常大；其次，补偿处理中目标点与其邻近点的包络畸变也有差别，虽然目标点的包络有可能得到较好的畸变校正，但处理之后的邻近点目标成像的成像畸变仍然存在，畸变的部分能量会干扰目标点位置的成像结果，造成成像质量的下降，因此在补偿算法的实现中必须要考虑对邻点干扰的抑制。

5.2.1 补偿后的残余邻近点干扰

抖动产生的畸变具有时变性，所以在成像分析中必须要加入对邻近点的成像干扰，才能得到图像畸变的全部特征。但是经过补偿处理之后，时变效应依然存在于图像之中。在补偿算法的设计过程中，不仅需要考虑补偿当前点的成像误差，还需要尽量抑制邻近点在此处的干扰能量。

高频抖动造成的畸变具有时变性，通过邻近点干扰可以描述这种现象对成像的干扰，类似的现象在补偿之后的结果中仍然存在。邻近点干扰现象难以消除的一个重要原因在于，各个点回波的信息重合在一起，在成像过程中没办法彼此分开。比如两个邻近的点目标 A 和 B ，两点在方位向相距 $f_{jitter} / K_a \cdot v_r$ ，抖动频率

为 f_{jitter} 的指向误差产生的第一对虚目标会干扰另外一个点的主目标成像，但是通过计算发现，在本文的反正背景下，当相对抖动频率为 10，两点之间的距离也仅为 $0.0255 \cdot L_{SAR}$ 也就是说，两个点之间在方位向时间有超过 97% 的重合率，考虑到边缘能量较低，实际的能量重合度或者说信息重合度更高，这就排除了通

过加时间窗的方式在成像过程中将 A, B 两点的回波信息区分开的实现可能性。

当我们对 A 点做做抖动补偿的时候，其邻近点 B 没办法得到完美补偿，而且 B 点仍然会有畸变能量影响 A 点的成像，虽然这种影响已经被降低。如图 5-3 所示，是抖动补偿之后仍然存在邻点干扰的原理示意图。横坐标是方位时间和合成孔径时间的比值，因为两条曲线，纵坐标为回波幅度，图中三条曲线分别代表有抖动的时候目标点 $(0,0)$ ，目标点的某个邻点 $(0, f_{sw} / K_a)$ ，及无抖动时候的回波幅度曲线。图中抖动为单频抖动，幅度为 $0.4 \cdot \theta_b$ ，抖动频率为 $12/T_{SAR}$ ，抖动相位对结果没有影响。

这里我们使用单一频率高频抖动的成像过程对抖动补偿中的残余邻点干扰进行说明，如图 5-3(a)所示，蓝色曲线是点目标 A 的幅度畸变曲线，绿色是 B 的畸变曲线，红色为理想回波曲线作为参考幅度。图中的抖动参数为，相对频率为 10，相对幅度为 0.4，相位为 0。图(a)是回波脉冲的相对幅度，在这里只取了零多普勒点附近的部分；在绘图的时候对 B 曲线做了少量平移，以方便和 A 曲线对比。

从图(a)中看 A, B 两点目标的回波畸变幅度的差距并不是很大，但是若使用对应于 A 点的抖动补偿处理器对两点同时进行处理，则会导致图(b)所示的结果。在图(b)中，原有的回波幅度起伏得到抑制，但是会产生一种新的回波幅度畸变，这就是残余邻点干扰的产生原因。

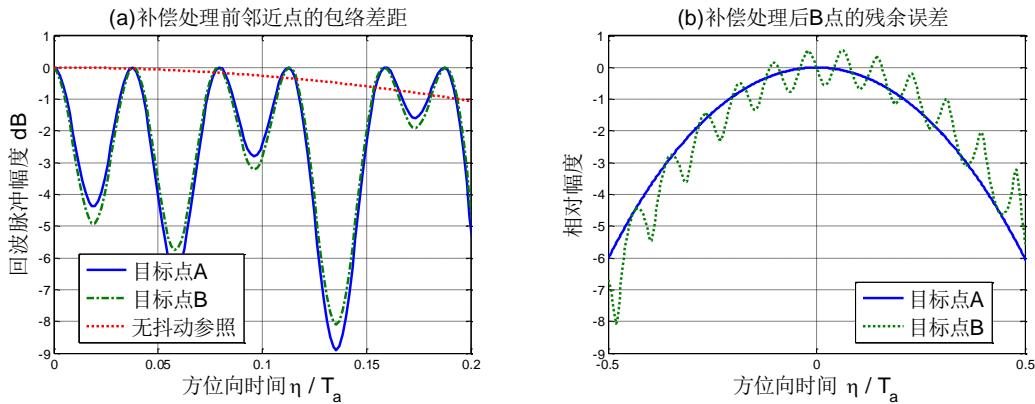


图 5-3 补偿前后的回波幅度历程

经过补偿和成像处理之后，得到 A, B 点的方位向切面如图 5-4 所示。图中 A 点经过补偿之后得到了理想的结果，但 B 点成像中虚像畸变还是存在，仍然会影响 A 点的成像信息。

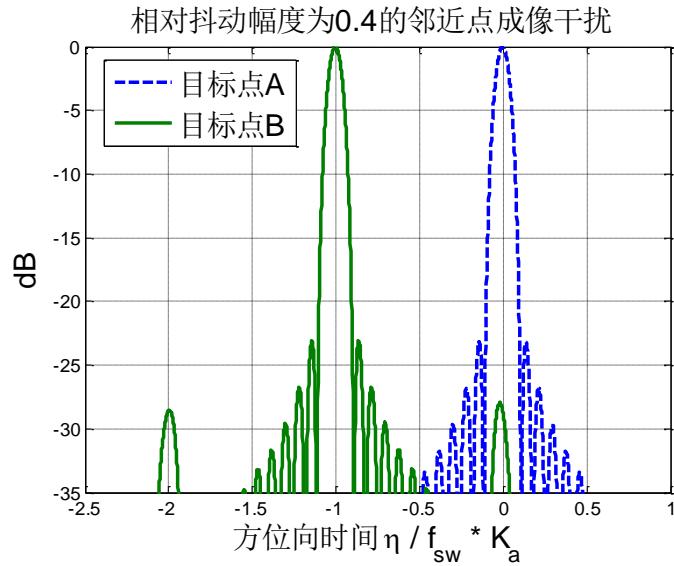


图 5-4 补偿后的残余邻点干扰

抖动补偿算法对成像中的邻点干扰都有一定的抑制作用，如果补偿之后的邻点干扰能量仍然高于许可的范围，如 SAR 系统中通常将旁瓣幅度阈值设定为 $PSLR_{Threshold} = -23 dB$ ，当超过这一阈值，有可能会发生强目标掩盖弱目标的现象，使得图像中的细节信息减少，动态范围下降。

在图 5-4 中，虚像的强度与主成像相比，低了 28 个 dB，这种旁瓣幅度水平不足以对成像结果产生明显影响。但是，残余虚像的幅度与抖动的频率和幅度有关，当单频抖动的参数为： $0.55 \cdot \theta_b$ ， $\frac{18}{T_{SAR}}$ ，虚像幅度会达到-18 dB，如图 5-5 所示。

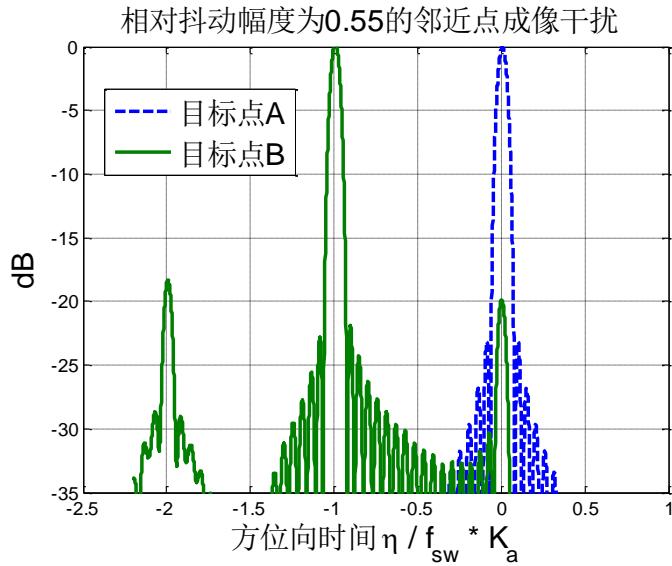


图 5-5 超出 PSLR 阈值的残余邻近点干扰

本文提出了一种基于方位向包络校正的运动补偿算法 MoCo-AEMC (Motion Compensation based on Azimuth Envelope Modulation Correction), 该算法能够有效抑制波束抖动导致的邻近点干扰。

5.3 算法实现

补偿的基本思路是利用姿态数据，校正方位向包络畸变，但是在算法实现中还需要考虑一些细节问题，诸如：补偿域的选择，残余邻点干扰的抑制，算法运算量的优化等。

5.3.1 补偿域的选择

根据驻定相位原理 (POSP)，频域包络是时域包络的尺度变换，因此抖动补偿可以在频域进行，也可以在时域进行。不过在补偿实验中发现，当抖动的相对频率较低的时候，时域补偿和频域补偿都可以达到较好的效果；但是当相对频域较高的时候，使用频域补偿会观察到很大的残余误差。

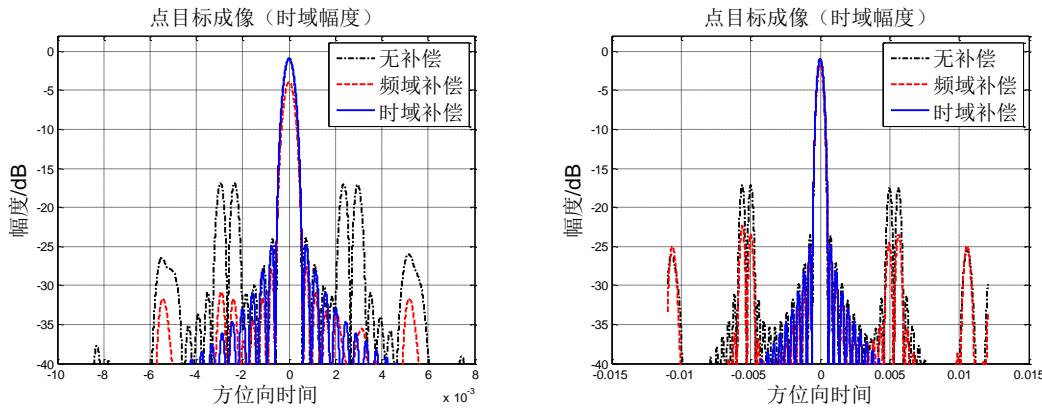


图 5-6 时域补偿和频域补偿的对比实验

在此对时域和频域补偿的仿真结果进行对比，得到的补偿实验结果如图 5-6 所示，在频率相对较低的情况下（左图的仿真参数 $[6, 0.3, \pi/4, 0]$ ），频域补偿和时域补偿的性能相似，都能够有效地降低旁瓣的能量；但是当相对频域提高到 12（右图的仿真参数 $[12, 0.3, \pi/4, 0]$ ），频域补偿之后的结果中仍然存在高幅度的旁瓣能量，远不能达到成像的要求。

为了分析这种现象产生的原因，在此对成像过程中的中间数据进行对比，发现当频率较高的时候，时域包络和频域包络会有较大的区别，这点与理论值有较大差异，如下图所示。

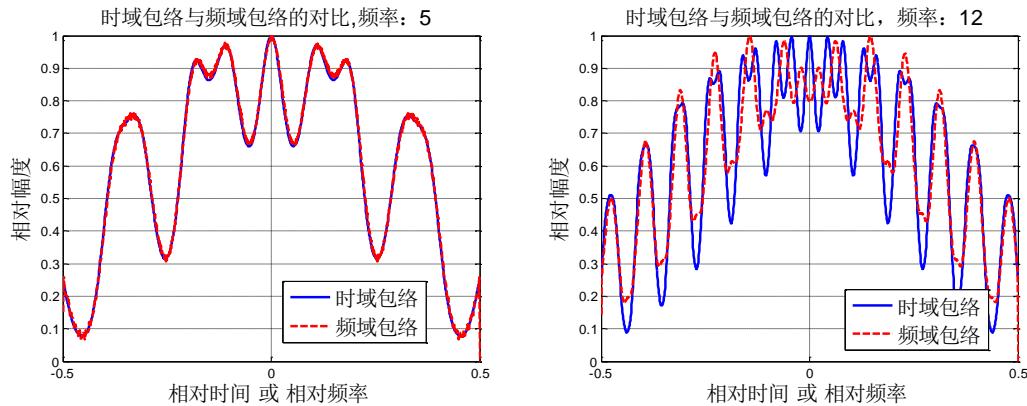


图 5-7 相对频率较高的时候时频包络有较大区别

如图 5-7 所示，是时域包络和频域包络的对比曲线，曲线的横坐标都选用了相对值，时间轴相对于合成孔径时间，频域轴相对于多普勒带宽。为了让结果更明显，这里对时域包络做了加窗处理，窗系数与方位向脉冲压缩中的窗系数相同。如左图所示，当相对频率为 5 的时候，频域包络与时域包络基本相似，但是右图中，当相对频率增大到 12，两种包络之间的区别就会非常明显，而且差异较大。

的部分还主要集中在中间能量较高的区域。

从理论分析来看，时域和频域包络会产生相当大的区别，是因为不满足驻定相位原理的包络缓变的结果。虽然查询到的文献中并没有给出包络缓变的具体界限，但是很明显，右图所示的情况不属于缓变的范畴。如果不能使用驻定相位原理，那么想解决高次相位积分的问题，从理论上推导频域的解析表达式，将会非常困难。

虽然可以通过数字处理的方式，模拟方位向信号并经过 FFT 得到频域包络的估计值。但是用这个估计值去做抖动补偿仍然存在问题，因为有一部分畸变信息进入了频域的相位中，即使能够将频域的包络补偿到理想水平，但是频域相位中的畸变依然存在。而且因为解析表达式未知，频域的残余相位畸变的校正会变得非常困难。

相比之下，直接进行时域补偿则不存在这些问题，可以直接用脉冲强度估计序列生成补偿滤波器。补偿滤波器用于对回波信号进行包络校正，校正处理必须要在方位向脉冲压缩之前进行。当时域包络校正完成之后，包络不再有明显的起伏现象，符合缓变假设，对后续的频域处理不会产生复杂影响。

虽然频域补偿在运算效率上略有优势（频域补偿相比之下少了两步 FFT，而且滤波器能与方位向压缩滤波器合在一起），但是本文仍然推荐全部的抖动补偿都在时域进行。当相对频率较小的时候，频域补偿结果虽然幅度（PSLR）较低，但是仍然有相对较高的旁瓣总能量（ISLR），如下图所示。

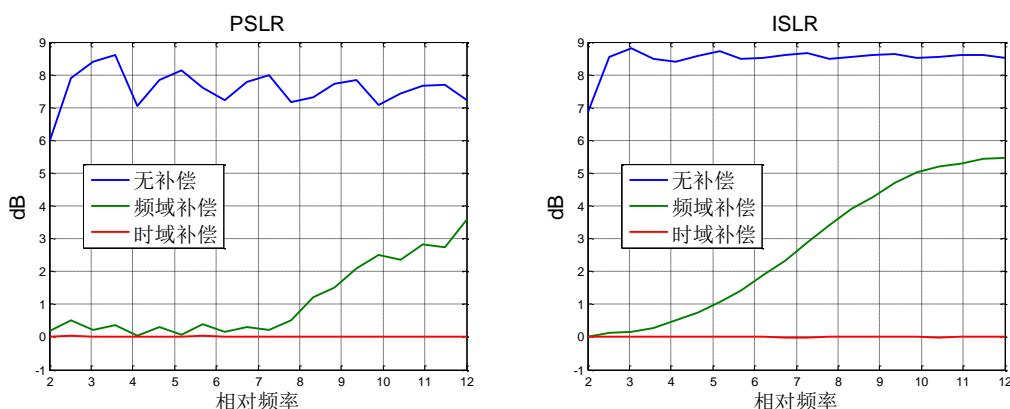


图 5-8 频域补偿与时域补偿的性能对比

在图 5-8 中，仿真使用的参数为：相对抖动幅度 0.3，相对频率从 2 到 12 之间变化。左图当频率介于 2 到 8 之间的时候，时频补偿的旁瓣幅度差距并不明显，但是积分旁瓣比已经增加了 3.5 个 dB，这会导致图像信噪比的恶化。右图中的

ISLR 持续增加，增加幅度相对稳定。图中曲线往往存在波动，波动原因主要是虚像位置变化导致虚像幅度收到主成像副瓣的干扰。

5.3.2 补偿与成像处理的次序

抖动补偿可以以预处理的方式进行，即先补偿，后图像处理的方式。但是更好的办法是将抖动补偿嵌入到成像处理的步骤中间，这样做可以大幅度提高算法的运算效率。

因为抖动历程沿方位向和距离向都存在着时变性，或者说地图上两个相邻目标在波束照射时间内，回波幅度历程都会存在差别。所以算法在执行的过程中，需要对每个像素点分别计算回波幅度历程。系统每进行一次抖动补偿计算，需要对图像中的每一个坐标点分别估计回波幅度历程，实验输出的图像中，也只有这一个坐标点上的成像结果得到了最佳补偿。

但是这样的实现方法会大大降低算法的运算效率，必须要改进算法的运算消耗，才能满足工程实现的要求。最简单的提高执行效率的方法，是将补偿过程最优化地嵌入到成像算法中，而且这种算法对补偿性能是没有影响的。

为了节省运算消耗，运动补偿处理应该尽量安排成像过程中靠后的位置。在多数算法中，运动补偿都可以放在距离向压缩，距离单元徙动校正这两个步骤的后面进行，而距离压缩和 RCMC 往往是算法中消耗计算量最大的两个过程。因为不用对每个点分别做距离压缩和 RCMC，补偿计算的总时间就明显缩短了。

以最常见的 RD 算法为例，在 RD 算法中进行抖动补偿的流程如图 5-9 所示，将包络畸变校正放在方位向脉冲压缩之前处理，这样虽然多了两次傅立叶变换的计算，但是避免了重复进行二次距离压缩插值和距离徙动校正插值的计算，这两次插值是整个成像过程中消耗了最大运算量的计算过程。实践中发现，这种改进可以将算法的运算时间缩短几十倍。当然，对其他常见的成像算法，如 CS 算法， $\omega-k$ 算法等，都可以做类似的改进。

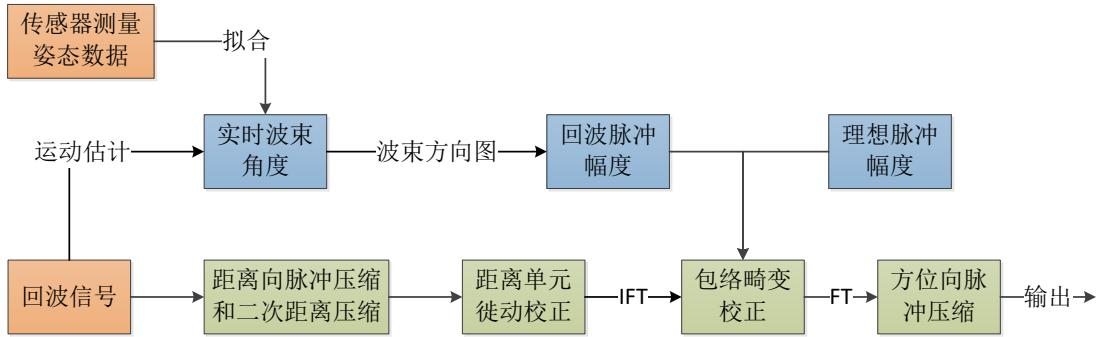


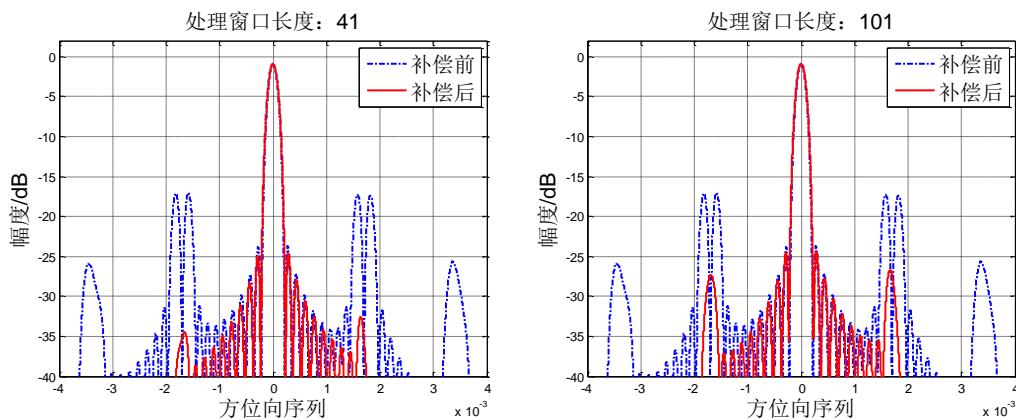
图 5-9 MoCo-AEMC 补偿算法与 RD 成像算法的结合

5.3.3 执行效率的进一步优化

为了尽可能的提高算法的精度，抖动补偿的计算总是逐点进行，但是这样会导致算法的执行效率相对较低。一种折衷的办法是将邻近的几个点使用同一个补偿滤波器，这样会降低补偿精度，但是能成倍地提高算法的执行效率。

为了说明这种方法，我们首先提出一个“补偿窗口长度”的概念。逐点补偿的方法可以看作是补偿窗口长度为 1；相应的，对相邻 N 个点的同时进行抖动补偿，则补偿窗口长度为 N。这种优化导致的性能损失，是补偿窗口变长之后，最终的成像畸变也会有所提高。

当补偿窗口增大的时候，产生最大误差的点总是位于窗口边缘的那个点。实验补偿窗口增加之后，边缘点的成像情况仿真如图 5-10 所示，三幅图中的补偿处理窗口长度分别为 41 个点，101 个点和 201 个点。抖动参数设定为 $[10, 0.3, \pi/6, 0]$ 。



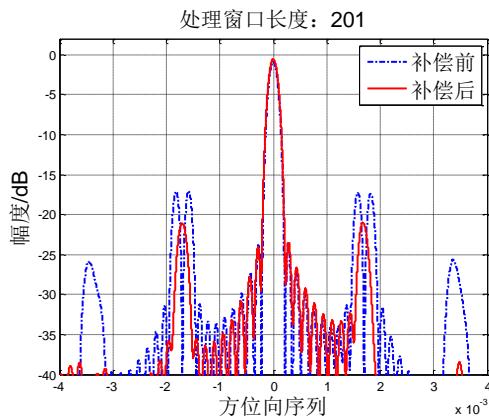


图 5-10 增大补偿处理窗口之后的性能损失

在进行补偿窗口优化之前需要知道系统对畸变程度的容忍度，以及系统的抖动模型的，然后控制畸变程度在可承受的范围之内。在给定容忍度的前提下，系统允许的最大处理窗口可以定义为最大窗口 N_{\max} 。最大窗口的取值与系统模型，抖动模型，系统容限等多个因素有关。

对最大窗口的计算方法举例说明如下，当抖动模型设定为[10, 0.3, pi/6, 0]的时候，仿真最大窗口与最大畸变之间的关系如图 5-11 所示，左图中，初始的 PSLR 缓慢增加，主要原因是主成像幅度的缓慢下降，但是当虚像的能量超过了主成像的第一旁瓣幅度，此后的 PSLR 损失上升迅速，这就形成了 1.2dB 附近的转折点。而在右图中 ISLR 的上升趋势是相对稳定的。假设系统可以容忍 1dB 的额外 PSLR 损失和 2dB 的额外 ISLR 损失，则可以选择的最大补偿窗口为 1.1 个抖动周期，约和 119 个分辨率单元。

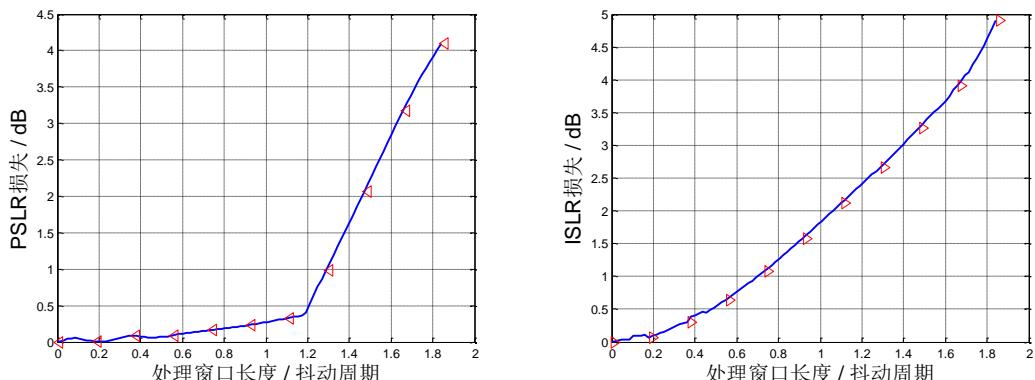


图 5-11 最大处理窗口与图像性能损失之间的关系（水平抖动）

补偿窗口随着抖动相位的变化非常小，基本可以忽略，但是受到抖动平面的

影响却很大，比如，在抖动参数为 $[10, 0.3, \pi/6, \pi/4]$ ，也就是抖动平面倾斜了 45 度的情况下，得到试验结果如下所示，此时可以将幅度限定在 1.4 个抖动周期，对应着约 150 个分辨率单元。

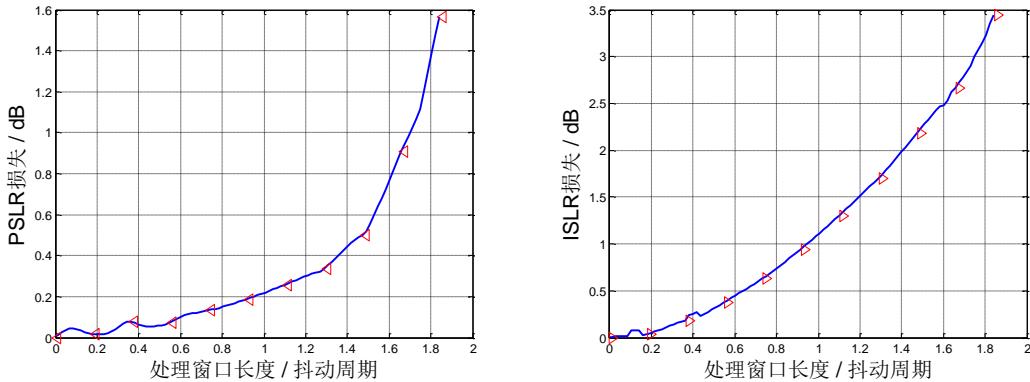


图 5-12 处理窗口长度和图像性能损失 (倾斜抖动)

5.4 性能分析

带有抖动补偿处理的 SAR 成像系统仍然是一个线性时变系统，所以系统性能的评价至少要从两个方面分析，一是冲击响应或者说点目标成像性能，二是时变性对成像的影响或者说邻近点成像干扰。除此之外，本文还对成像区域进行抖动补偿综合仿真，对使用 MoCo-AEMC 算法补偿前后的图像熵和还原度进行了对照试验。

从卫星总体设计角度考虑，系统对抖动的容忍度是一个重要的指标。在本节内容中，我们对比了补偿前后系统的抖动容限。实际情况下还存在随机抖动无法准确测量，或者拟合得到的姿态数据中包含固定偏差的情况，当使用这种不准确的姿态数据进行补偿，MoCo-AEMC 算法的性能也在本节内容中进行了分析。

5.4.1 点目标补偿性能

高频抖动导致的主要畸变是主成像两侧的成对虚像，补偿抖动畸变的目的是尽可能地降低虚像的幅度和能量，使用峰值旁瓣比 (PSLR) 和积分旁瓣比 (ISLR) 两个性能指标可以充分反映抖动补偿算法对虚像的抑制效果。补偿中会对一部分能量较高的回波脉冲降低幅值，同时抬高部分能量较低的脉冲幅度，这会对主瓣成像造成一些影响，表现为幅度下降和峰值加宽，这方面通过 IRW 和峰值幅度

两个指标来衡量。

通过点目标成像仿真发现,在相对抖动角度小于 0.35 的情况下,MoCo-AEMC 算法相比现有的补偿算法有较大的性能提升。如图 5-13 所示,左右两幅图分别为峰值旁瓣比和积分旁瓣比,通过这两个参数来说明补偿算法对旁瓣能量的补偿效果。两幅图中的四条曲线分别为无补偿的旁瓣性能、现有相位校正方法、频域包络校正方法以及时域包络校正的 MoCo-AEMC 方法的补偿结果。

在选择现有算法作性能对比的时候,本文对“2D-PGA 补偿算法”和“二维相位畸变补偿”这两种方法都做了仿真。只不过在本文的仿真条件下,两种补偿方法表现出来的算法性能几乎没有差别,因此图中也只用了一条曲线。

仿真中使用的抖动模型为单频率高频抖动,抖动平面位于方位向,相位频率为 6, 相对幅度从 0 到 0.35 之间变化,抖动相位设置为随机。仿真性能如图 5-13 所示。

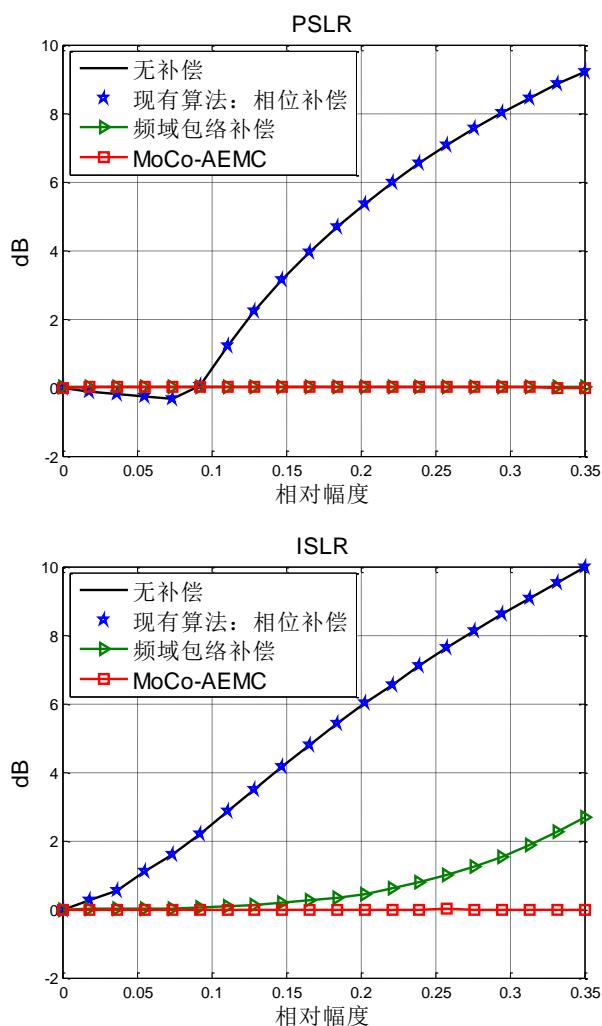


图 5-13 三种算法的点目标补偿性能对比

通过仿真结果发现，三种算法对单点目标的补偿性能有着明显的差异。现有的相位补偿方法和无补偿的旁瓣性能结果几乎没有区别，产生这种现象的原因已经在 3.1.1 小节中做了分析。

本文提出的 MoCo-AEMC 表现出非常好的性能，随着抖动幅度的上升，旁瓣性能指标几乎没有变化。频域包络校正算法是本文在早期研究中所尝试的补偿算法，在相对幅度低的时候性能与 AEMC 算法相似，但是在幅度变大的时候，旁瓣抑制性能比较差，因此本文最后选择了时域包络校正的方法取代了频域校正。

如前所述，频域补偿对相对高频的抖动误差的补偿效果较差。为了验证这种现象，将相对频率设定为 10，重新做一次仿真，除了频率之外，其他参数设定保持不变。实验结果如图 5-14 所示。

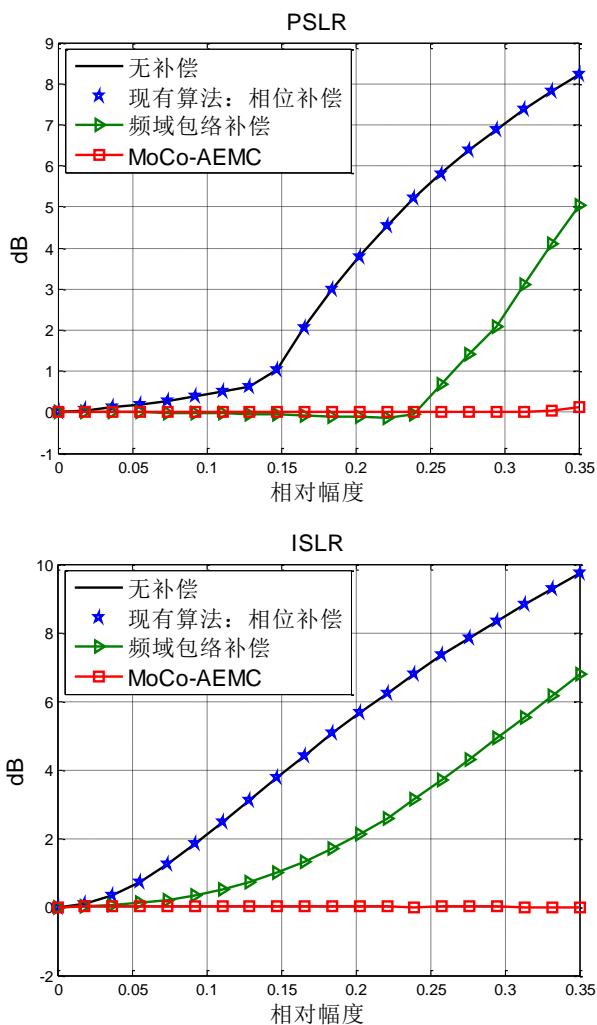


图 5-14 相对高频条件下三种补偿算法的旁瓣性能对比

与图 5-13 相比，相对频率增加之后，频域包络补偿（绿色曲线）的旁瓣抑制性能有了明显的恶化，尤其是在抖动幅角 0.25 以上，PSLR 和 ISLR 两个参数

都有显著的提升，在 0.35 的位置，PSLR 损失达到 4.5dB，ISLR 损失 7dB，这对成像的影响都会非常显著。相比之下，AEMC 算法仍然能够保持理想的旁瓣抑制性能（红色曲线）。

表格 4 三种补偿算法的旁瓣性能损失 (PSLR , dB)

相对幅角	幅角(°)	相位补	频域包络	MoCo-AE	相位补	频域包络	MoCo-AE
		偿	补偿	MC	偿	补偿	MC
相对频率: 6/真实频率: 15Hz				相对频率: 10/真实频率: 26Hz			
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.015	-0.122	0.008	0.000	0.143	0.001	0.000
0.1	0.031	-0.139	0.020	0.000	0.372	-0.018	0.000
0.15	0.046	2.708	0.035	0.000	1.484	-0.056	0.000
0.2	0.062	4.830	0.054	-0.001	3.912	-0.113	0.000
0.25	0.077	6.483	0.079	0.000	5.751	0.557	0.000
0.3	0.093	7.811	0.117	0.023	7.203	2.433	0.003
0.35	0.108	8.895	0.172	0.108	8.375	5.004	0.113

表格 5 三种补偿算法的旁瓣性能损失 (ISLR , dB)

相对幅角	幅角(°)	相位补	频域包络	MoCo-AE	相位补	频域包络	MoCo-AE
		偿	补偿	MC	偿	补偿	MC
相对频率: 6/频率: 15Hz				相对频率: 10/频率: 26Hz			
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.05	0.015	0.810	0.013	0.000	0.594	0.091	0.000
0.1	0.031	2.392	0.065	0.000	2.090	0.405	0.000
0.15	0.046	4.145	0.188	0.000	3.842	1.036	0.000
0.2	0.062	5.805	0.442	0.000	5.529	2.066	0.000
0.25	0.077	7.309	0.900	0.000	7.086	3.421	0.000
0.3	0.093	8.680	1.639	0.010	8.465	5.061	0.000
0.35	0.108	9.906	2.682	0.107	9.705	6.781	-0.015

提取上述实验中的部分数据，并汇总如表格 4 和表格 5 所示。表中“幅角”一列中的数据是第一列的相对幅角在本文的仿真模型（参数见 2.2.1）中对应的角度值。表中灰色区域对应相对频率为 6，蓝色区域对应相对频率为 10。

5.4.2 邻近点干扰抑制的性能对照

由于抖动影响的时变性，点目标成像就不能作为补偿算法性能的唯一性能指标。补偿之后会存在残余的邻近点干扰，在这一节将分析不同的补偿算法对邻近点干扰的抑制能力。在这里，用邻近点所能产生的最大干扰幅度（相对）为评价算法干扰抑制能力的指标。

对成像区域内某一个点 O 进行补偿的时候，邻近的各个点目标也会有旁瓣会影响到 O 点的成像，假设其中有一点 A，在 O 点位置的旁瓣幅度与 A 点本身成像幅度的比值，比其他任何邻近点都要大。则将 A 点在 O 点处的旁瓣幅度记为邻近点干扰幅度。

尝试了使用三种不同的算法进行补偿，在实验中变化抖动幅度进行成像实验，并记录每次实验中的邻近点干扰幅度。图中的抖动相对频率设定为 6，实验结果如图 5-15 所示。

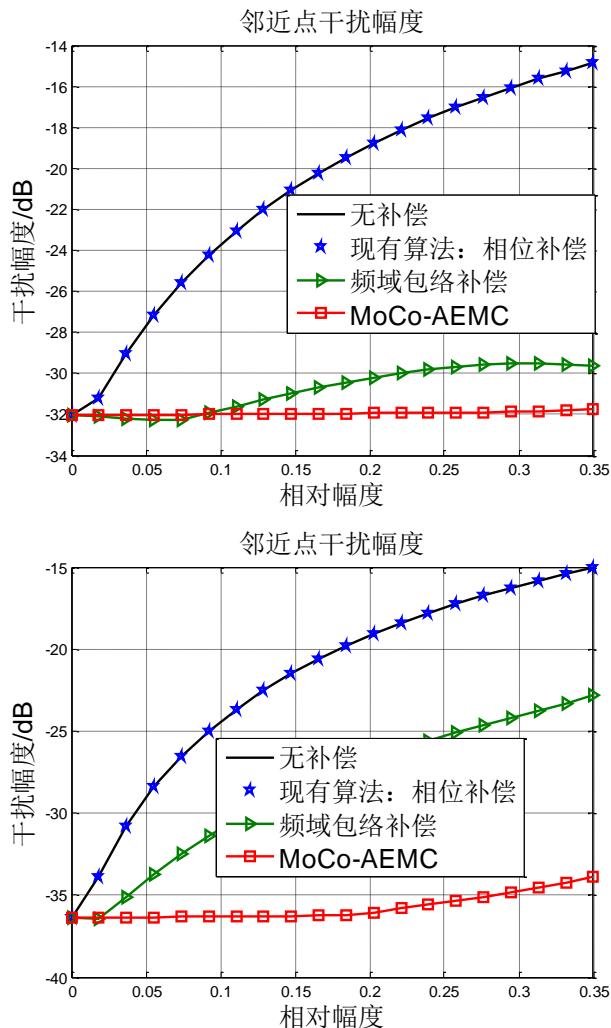


图 5-15 三种算法的邻近点干扰抑制性能对比

一般要求旁瓣的干扰幅度不能高于-23dB，在试验中发现，使用相位补偿的方法对邻近点干扰仍然没有抑制作用；而包络补偿方法则多数情况下都可以将邻近点干扰幅度降低在-23dB 的阈值之下。其中时域包络补偿的性能又优于频域包络补偿算法。对应的数据整理如表格 6 所示。

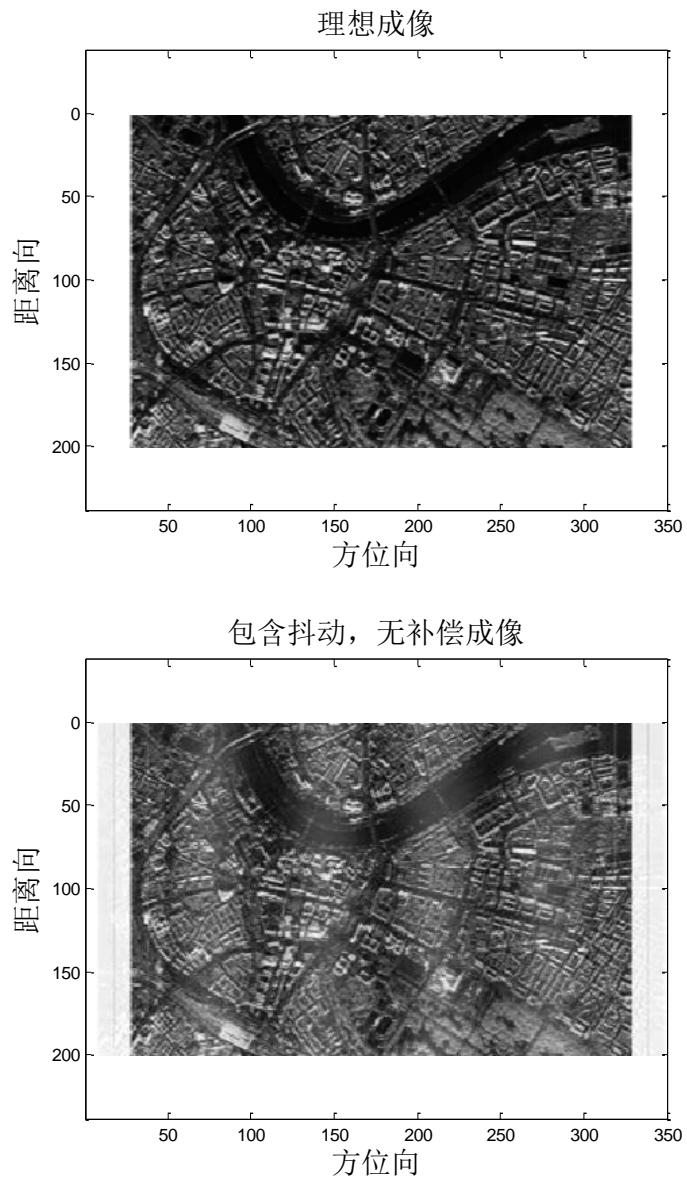
表格 6 三种算法的邻近点抑制性能对比

相对幅角	真实幅角(°)	相位补偿(dB)	频域包络补偿(dB)	时域包络补偿/MoCo-AEMC(dB)	相位补偿(dB)	频域包络补偿(dB)	时域包络补偿/MoCo-AEMC(dB)
		相对频率: 6/真实频率: 15Hz			相对频率: 10/真实频率: 26Hz		
0	0.000	-32.028	-32.028	-32.044	-36.390	-36.390	-36.375
0.05	0.015	-27.669	-32.247	-32.021	-29.034	-34.128	-36.341
0.1	0.031	-23.708	-31.801	-31.998	-24.386	-30.930	-36.306
0.15	0.046	-20.948	-30.943	-31.973	-21.377	-28.557	-36.268

0.2	0.062	-18.879	-30.240	-31.946	-19.187	-26.742	-36.092
0.25	0.077	-17.253	-29.740	-31.913	-17.493	-25.297	-35.436
0.3	0.093	-15.941	-29.508	-31.879	-16.139	-24.056	-34.752
0.35	0.108	-14.865	-29.651	-31.751	-15.036	-22.842	-33.900

5.4.3 区域成像的补偿对比

区域成像的补偿对比是通过对同一个散点模型，生成有抖动和无抖动的回波矩阵，并分别进行成像处理和补偿之后的成像处理，得到的仿真结果如图 5-16 所示：



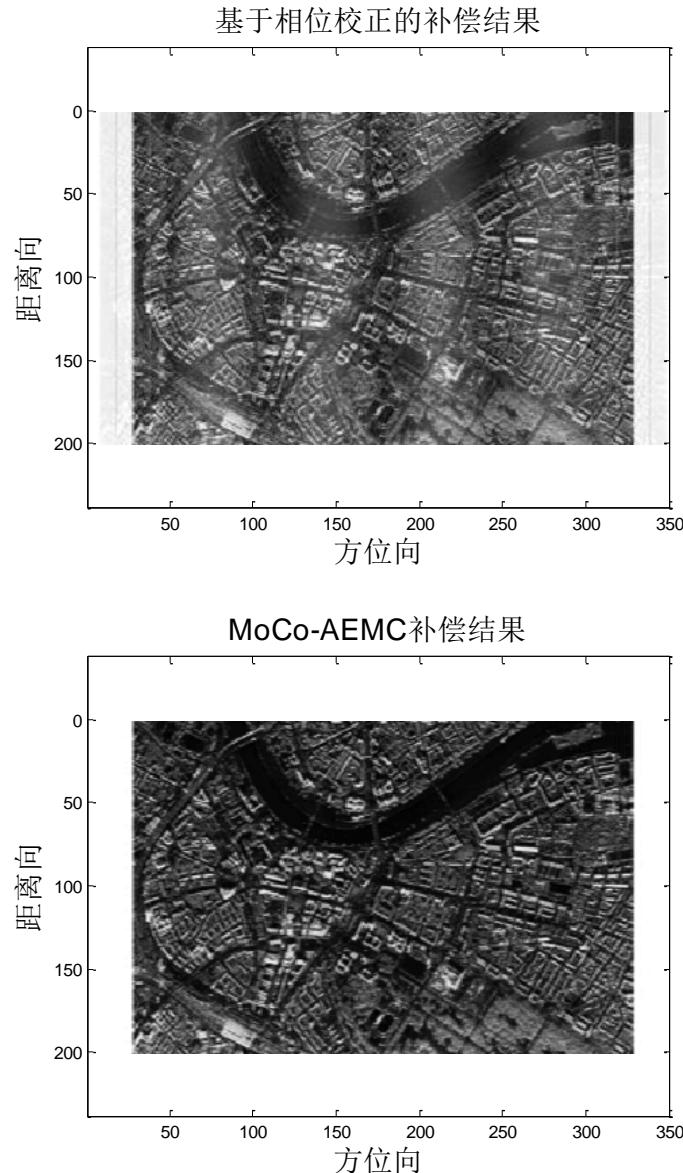


图 5-16 区域目标的补偿对比

实验中使用的抖动模型为 $[8, 0.35, 0, 0]$ ，上图中第一副为无抖动的成像结果，第二幅加入了抖动，出现了明显的明暗条纹，产生这种现象的原因已经在上一章中详细描述并做了理论分析。第二幅是抖动回波的直接成像，如果是先做补偿处理，再做成像处理，就能得到第三幅图所示的结果，图中看出，图像中的条纹消失了，成像结果与图像 1 更加相近。

评价实验结果性能最重要的指标应该是图像的匹配度，或者说成像还原度。本文用实验得到的图像矩阵之间的相关系数来衡量图像还原度，公式为：

$$r = \frac{\sum \sum (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum \sum (A_{mn} - \bar{A})^2 \right) \left(\sum \sum (B_{mn} - \bar{B})^2 \right)}} \quad (47)$$

经过计算发现，图像 1 和图像 3 之间的相关系数为 0.9999；相比之下，图像 1 和图像 2，也就是有无抖动的图像之间，相关系数为 0.9734。相比之下，现有的基于相位畸变校正的补偿方法对抖动引起图像畸变的校正效果不显著。

保持以上的抖动参数不变，变换地面场景重新做高频抖动补偿的仿真实验，得到图像和还原度结果对比如下：

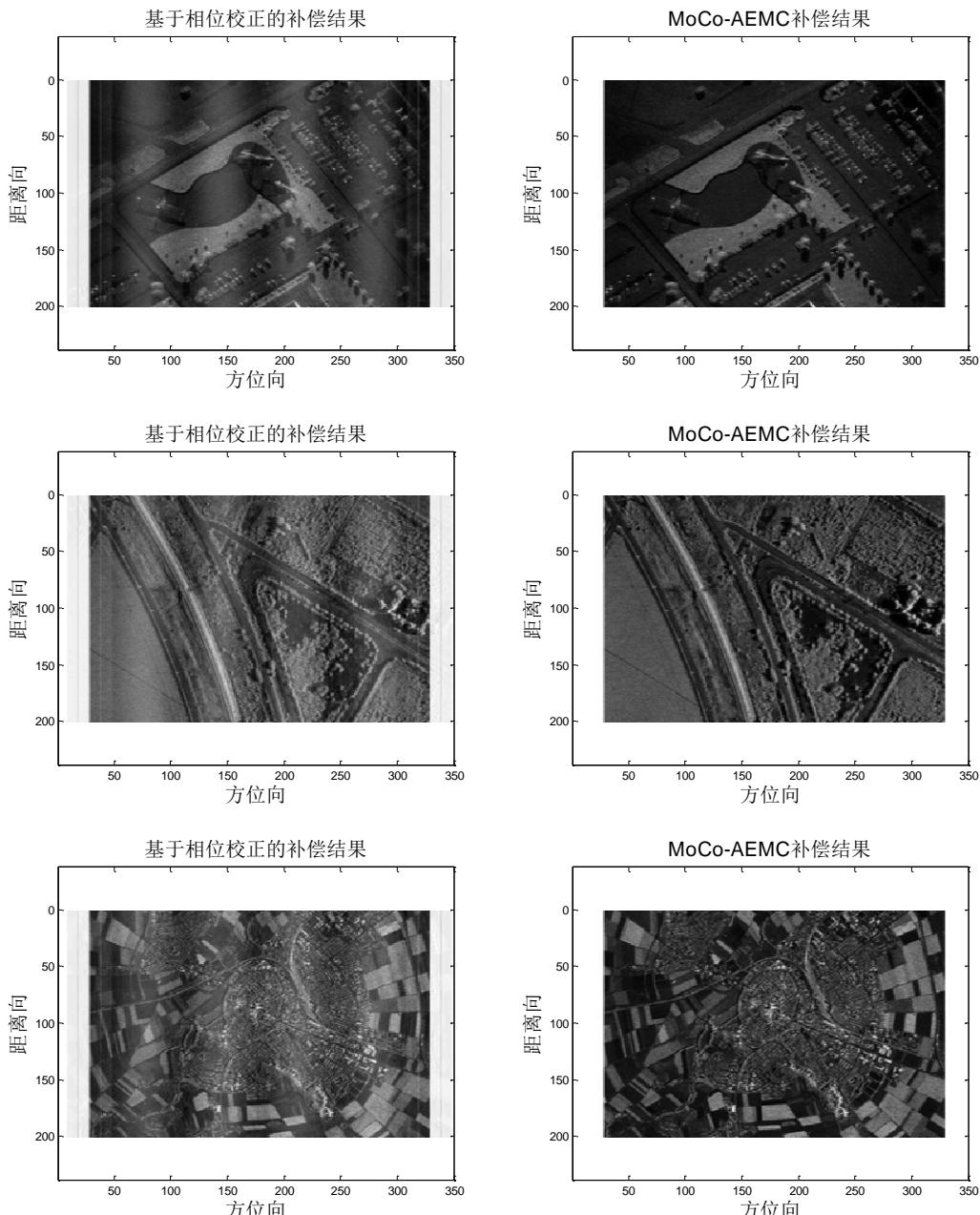


图 5-17 对照试验：相位校正和 AEMC 的区域补偿效果

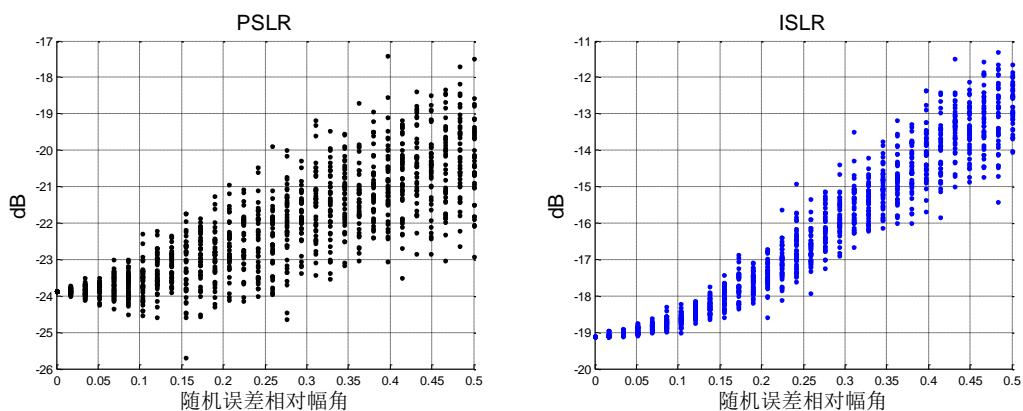
表格 7 两种补偿方法的还原度性能

	补偿前的图像还原度	相位畸变校正之后的图像还原度	MoCo-AEMC 补偿后的图像还原度
第 1 组试验	0.9710	0.9710	0.9999
第 2 组试验	0.9719	0.9719	0.9999
第 3 组试验	0.9721	0.9721	0.9999

5.5 姿态数据误差和补偿性能

实施精确补偿的关键在于获得精确的天线指向。地面站接收到星上多个运动传感器的测量数据后，经过地面的滤波处理，可以得到非常高的姿态精度。但即使传感器数据非常精确，补偿所用的波束指向与实际的波束指向之间的误差仍然无可避免，本节在分析中认为未建模误差为随机误差。

随机误差是指误差角存在方向和幅度上的随机性，本文假设幅度服从高斯分布，误差方向服从均匀分布。设定抖动模型为单频抖动，参数[6, 0.3, 0, 0]，随机误差的幅度从 0 到 0.5 线性增加（这里仍然是用的相对角度）。对每个角度做 40 组实验，用含有随机抖动的模型生成信号，再使用理想抖动模型进行补偿，最终得到点目标成像性能的散点图如图 5-18 所示



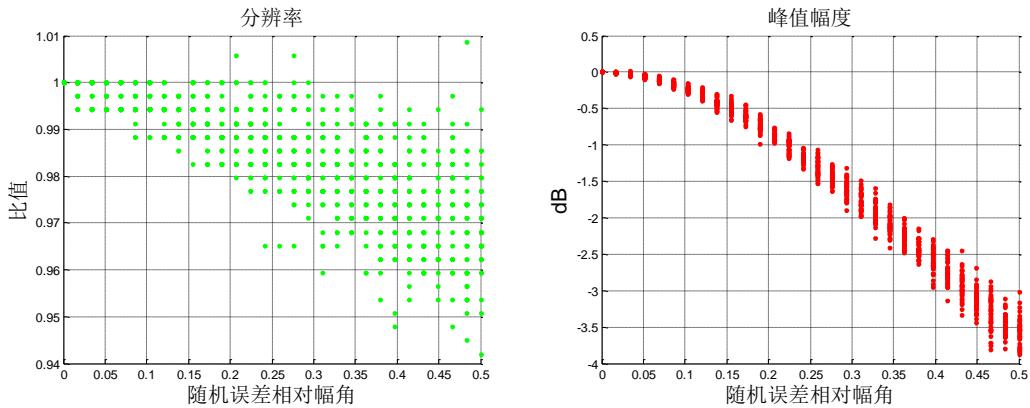


图 5-18 含有随机抖动的模型补偿之后的点成像性能

图中可以明显看出，随着随机抖动角的增大，补偿之后的图像旁瓣抬高，主瓣下降，分辨率只有很少的变化。对以上数据进行统计分析得到以下结果

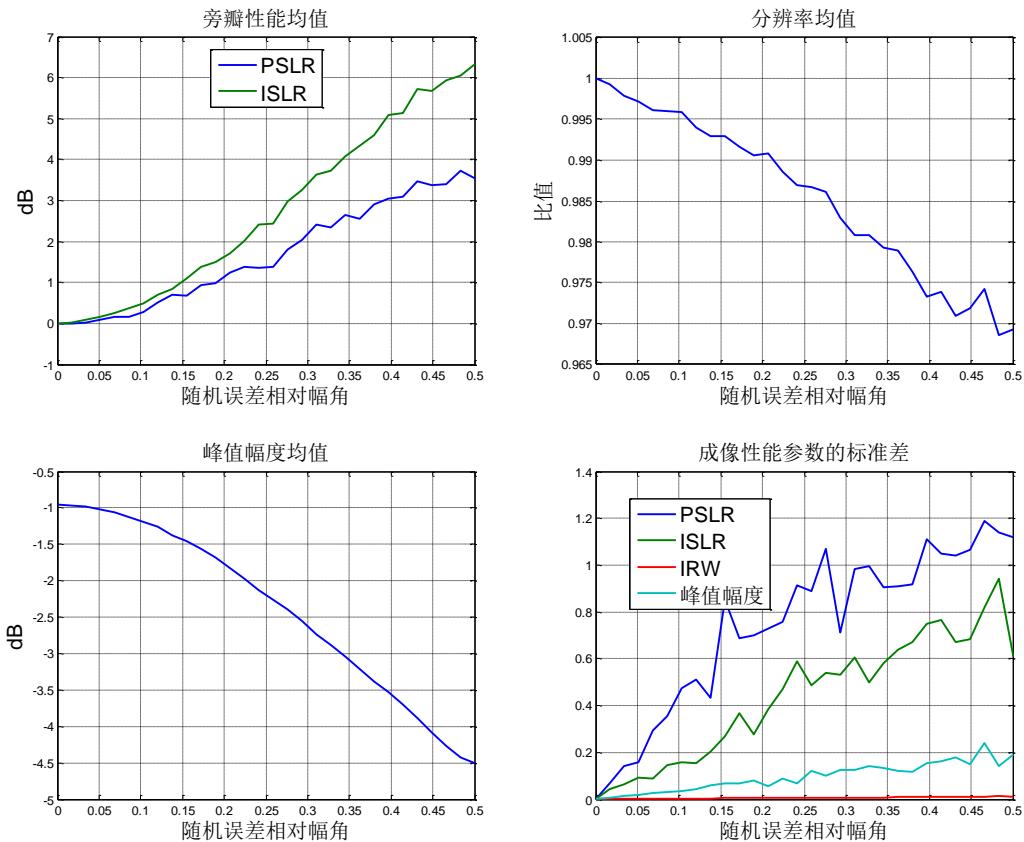


图 5-19 随机试验的统计分析结果

随着随机抖动角的增大，旁瓣相对幅度和能量都显著抬高，主瓣幅度显著下降，分辨率变化非常小，发生这种变化的标准差是峰值旁瓣比最大，积分旁瓣比其次。主瓣性能的分布相对集中。

5.6 补偿后的抖动阈值

补偿前的抖动阈值主要由旁瓣性能决定的，当抖动幅度较大的时候，旁瓣幅度增大，PSLR 和 ISLR 这两个旁瓣质量参数最能表征抖动对成像畸变的影响，因此选择这两个参数来计算系统的抖动容限。

经过补偿处理后，点目标自身的旁瓣幅度已经能够被压制在理想阈值以下，但是因为照射时间和回波幅度等因素导致的主瓣幅度下降仍然无法补偿。主瓣下降会导致系统的抗外界干扰能力下降，参数主要受到抖动幅角的影响。仍然以单品方位向抖动为例，变化相对抖动频率从 1 到 10，相对抖动幅角从 0 到 0.45，相位从 0 到 2π 。对每个抖动模型，进行抖动补偿的实验，并取出对应每个频率和幅度的峰值最大损失，得到结果如图 5-20 所示。

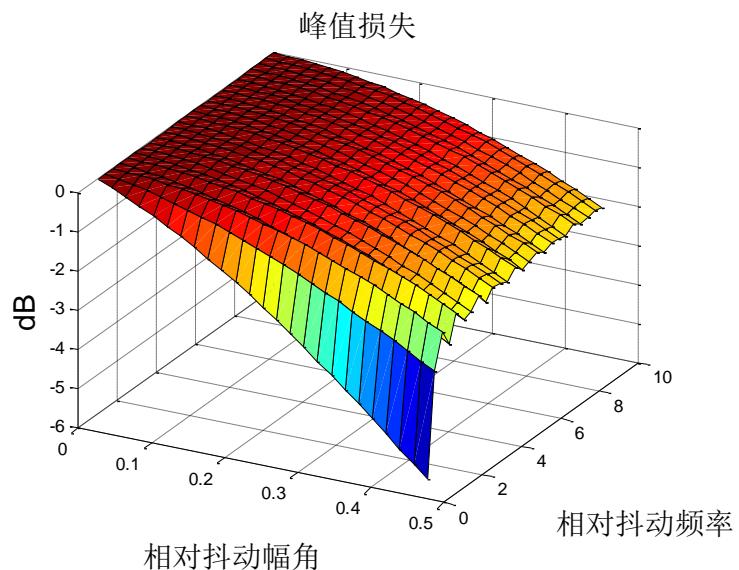


图 5-20 抖动补偿之后仍然存在峰值损失

图中部分数值如表格 8 所示：

表格 8 峰值损失实验数据

相对频率	相对幅角 幅角/°, 频率/Hz	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350
		0.000	0.015	0.031	0.046	0.062	0.077	0.093	0.108
1.000	2.610	0.000	-0.416	-0.904	-1.460	-2.081	-2.763	-3.500	-4.285
2.000	5.221	0.000	-0.115	-0.286	-0.512	-0.792	-1.125	-1.508	-1.940
3.000	7.831	0.000	-0.085	-0.224	-0.418	-0.665	-0.964	-1.312	-1.709
4.000	10.442	0.000	-0.070	-0.194	-0.373	-0.604	-0.887	-1.220	-1.600
5.000	13.052	0.000	-0.061	-0.177	-0.346	-0.568	-0.842	-1.166	-1.537

6.000	15.662	0.000	-0.055	-0.165	-0.328	-0.544	-0.812	-1.130	-1.494
7.000	18.273	0.000	-0.051	-0.156	-0.315	-0.527	-0.791	-1.103	-1.464
8.000	20.883	0.000	-0.048	-0.150	-0.306	-0.514	-0.774	-1.083	-1.440
9.000	23.494	0.000	-0.045	-0.145	-0.298	-0.504	-0.761	-1.067	-1.421

如果系统可以容忍 1dB 的峰值损失, 根据图 5-20 中的数据就可以得到系统对单频抖动的损失容限如图 5-21 所示。对比上一节的阈值结果, 系统对抖动的容限提高了一倍。

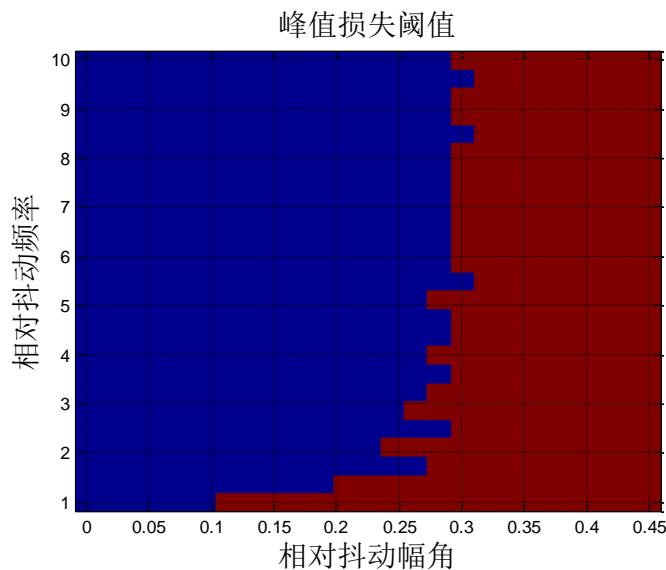


图 5-21 补偿后的阈值范围 (1dB 损失线)

除此之外, 残余邻近点干扰也可能导致图像失真, 这个参数同时则受到频率和幅度两个变量的影响不过这种现象在频率和幅角较低的时候并不明显, 比如说在上面的一组实验中, 临点的旁瓣畸变能量甚至低于正常成像的第一旁瓣, 远远不足以导致成像的畸变。

补偿之后的残余邻近点干扰在抖动幅度和频率两个参数都较大的时候会比较明显。为了说明这一现象, 重新做一组实验, 设定抖动幅度设定在 0.4 到 0.55 之间变化, 抖动频率从 10 到 25 变化, 仍然取所有相位中可能的最大旁瓣幅度。得到实验结果如图 5-22 所示。

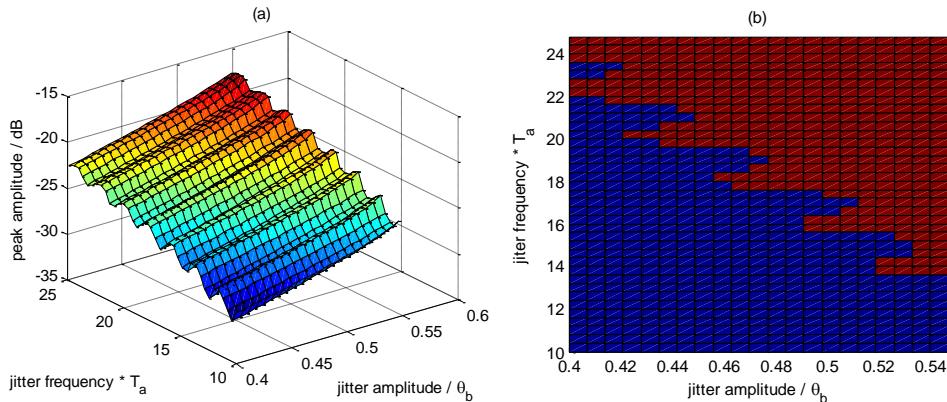


图 5-22 高频率高幅度情况下的邻近点干扰

如果设定-23dB 为 PSLR 阈值，低于阈值和高于阈值的幅度频率组合如右图所示：图中左下侧的蓝色部分，代表补偿后的残余畸变不高于阈值，相反右上侧的红色部分残余畸变仍然不可容忍。或者说，对于图中的红色部分，即使是精确得知所有的指向误差值，都没办法做到回波成像达到系统指标要求的水平。

不过在这种情况下，峰值的损失都已经高达 1.6dB~3.2dB，除非是在噪声水平非常低或者是回波能量富余较大的情况下，否则在阈值分析中可以忽略邻近点干扰这一问题，而仅仅关注峰值的损失。

对不同的系统和不同的抖动模型中也有不同的有效范围或者说补偿阈值，本文的仿真程序中提供了仿真接口，方便用于多种抖动模型和系统模型的性能实验。

5.7 本章小结

本章改进了高频抖动的补偿算法，抑制了旁瓣畸变水平，大大提高了伴随高频抖动收集到的雷达回波的成像质量。本章从算法原理、实现和性能分析三个方面对补偿算法进行了叙述，详细介绍了邻近点干扰现象对补偿的影响，补偿算法的时频域实现，以及补偿效率的提高等问题。算法的性能通过了多方面仿真进行了验证，算法在点目标补偿、邻近点干扰抑制、区域补偿等多个方面都比现有算法有明显的提升。补偿提高了成像质量，这样系统对卫星平台的抖动也有了更大的阈值，这部分内容本文也进行了分析对比。最后一节讨论了姿态误差的影响。

第六章 低频抖动的运动补偿方案设计

低频抖动能量在波束指向误差中占据了相当大的部分，并可能会造成严重的成像畸变。但是现有文献中对低频误差补偿的讨论非常少。有文献认为可以将高频补偿方法直接应用于低频，但是这种方法存在缺陷。对低频回波信号像高频那样直接做包络校正的话，需要提高处理窗口内部分较弱的脉冲的能量，却将分布能量较强的回波脉冲排除在窗口之外；这会导致回波能量的浪费和噪声能量的提高，最终影响成像质量。

经过上一章的抖动影响分析，我们知道，低频抖动造成成像畸变的主要原因还是雷达照射时间和多普勒中心频率偏移。因此本文的补偿策略也是从这方面入手。

6.1 低频抖动补偿的基本原理

低频补偿的基本思路是根据回波的幅度变化曲线，调整多普勒中心值和处理窗口系数，目的是脉冲压缩中有效利用的回波能量最大化，该算法称为基于多普勒中心动态调整的运动补偿算法(MoCo-AADC, motion compensation with adaptive adjustment of Doppler centroid)。

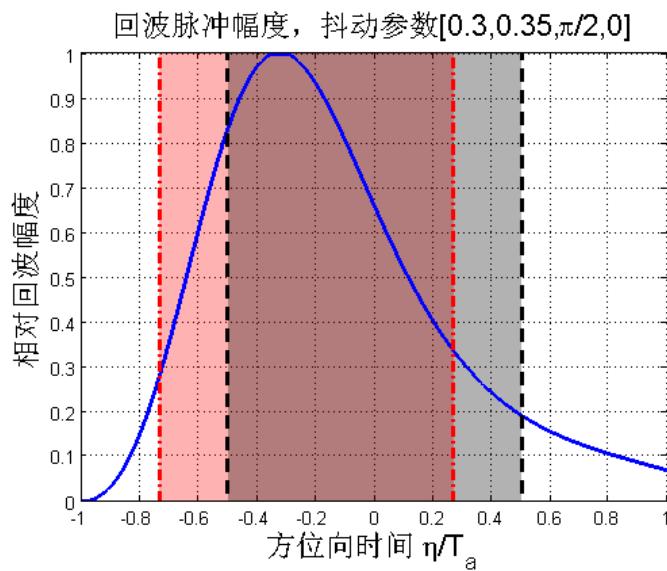


图 6-1 补偿前后的处理窗口对比

图 6-1 是当抖动参数为 $[0.3, 0.35, \pi/2, 0]$ 时，某点目标回波的幅度曲线。如果

不做补偿，直接进行成像处理，或者是直接对回波曲线进行包络校正，类似高频补偿那样。则处理中实际用到的能量就是图中 $\eta_c - 0.5T_a \sim \eta_c + 0.5T_a$ 的灰色区域（这里的 η_c 是理论多普勒中心，卫星正视则值为 0）。如果想要做到回波能量利用率的最优化，则应当将处理窗口设定为图中的红色区域 $\eta'_c - 0.5T_a \sim \eta'_c + 0.5T_a$ ，红色区域内的能量总和比灰色区域增加了 13%。提高回波能量利用率的关键是计算最优的多普勒中心值 η'_c 。

通过在成像处理过程中动态地调整多普勒中心值，MoCo-AADC 算法获得了回波理论效率的提高，并最终提高了成像结果的信噪比。其他方法不管是相位、包络校正或者是后期的图像处理算法都无法达到这种效果。为了说明 MoCo-AADC 算法在回波能量利用率方面的性能，本文将三种算法的能量利用效率进行了仿真对照，得到结果如图 6-2 所示。

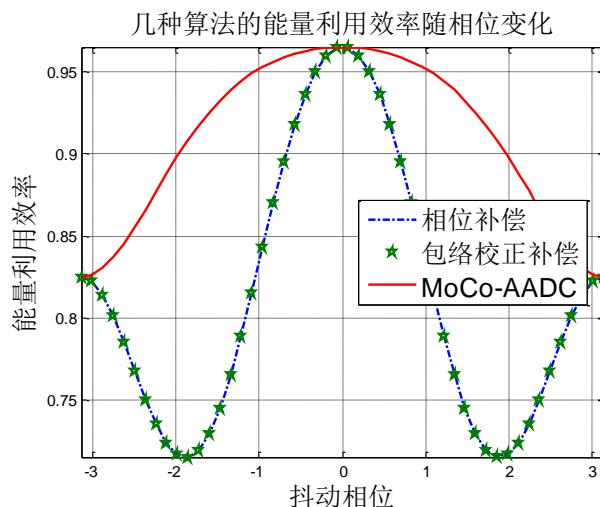


图 6-2 算法的能量利用效率对比

仿真参数为 $[0.1, 0.3, \varphi, 0]$ ，相位 φ 的变化范围从 $-\pi$ 到 π 。图中纵坐标代表能量利用率，是计算的方位向脉冲压缩处理窗口内的能量占回波总能量的比值。

回波利用效率会随着抖动相位的不同而变化：当抖动相位为 π ，天线抖动方向与波束照射区域的移动方向相反，对地面目标的照射时间长，回波幅度也高，这时候会有大量的回波能量落在处理窗口之外，因此能量利用效率较低；相反，当抖动相位为 0，照射时间短，大部分能量都落在了处理窗口内，所以能量利用效率反而高。不过这两种情况下多普勒中心没有因抖动而偏移，算法之间的能量

利用率没有明显区别。

而在 $\left(N + \frac{1}{2}\right) \cdot \pi$ 附近，多普勒中心偏移达到了最大值，这时候 MoCo-AADC

算法也获得了最大的利用率增强。从图中看到，此处附近 AADC 算法的能量利用效率远高于其他两种算法。

在上面的试验中，AADC 算法相比其他算法能获得最高 1.7dB 的信噪比增强，这个数值是与抖动的幅度和频率存在关系的。当相对幅角越大，获得的信噪比增强越高。在相对频率较低的时候，通过多普勒中心调整获得信噪比增益相对较大。具体数据如表格 9 所示，表中第一行是相对幅角，第二行是仿真中的幅角真实值；第一列是相对频率，第二列是仿真中的真实抖动频率。

表格 9 多普勒中心调整所能获得的最大信噪比增益 (dB)

	相对幅角	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350
相对频率	幅角 / °, 频率 / Hz	0.000	0.015	0.031	0.046	0.062	0.077	0.093	0.108
0.100	0.261	0.000	0.046	0.186	0.419	0.747	1.172	1.695	2.319
0.200	0.522	0.000	0.040	0.162	0.367	0.654	1.027	1.486	2.032
0.300	0.783	0.000	0.032	0.127	0.288	0.517	0.815	1.185	1.629
0.400	1.044	0.000	0.021	0.086	0.196	0.355	0.567	0.837	1.169
0.500	1.305	0.000	0.011	0.044	0.103	0.193	0.315	0.477	0.681
0.600	1.566	0.000	0.002	0.009	0.024	0.051	0.095	0.158	0.252
0.700	1.827	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.034	0.130
0.800	2.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.040	0.111	0.253
0.900	2.349	0.000	0.000	0.000	0.010	0.040	0.103	0.220	0.402

同高频算法的补偿一样，补偿计算的第一步仍然是要用星上的传感器信息计算波束指向的估计值；将指向估计值带入天线方向图函数，得到回波脉冲幅度的估计值。脉冲幅度估计值与锐化窗做卷积，输出序列的最大峰值位置对应着能量利用率最高的多普勒中心值。新的多普勒中心值用于 RCMC 和方位向脉冲压缩可以有效优化成像结果的信噪比。

基本原理如上所述，但是除了多普勒中心优化处理，还需要解决一些问题才可能得到理想的成像结果。在补偿算法的实现过程中，首先需要解决照射时长变化导致的幅度起伏问题；其次需要优化逐点补偿带来的计算量过大的问题。

6.2 仅包含低频抖动的成像补偿算法

6.2.1 算法实现

动态改变成像处理中多普勒中心值的方法虽然可以有效提高成像的能量利用率，但是多普勒中心优化之后，方位向坐标不同的点目标，成像幅度的差异仍然较大，需要进一步地校正。

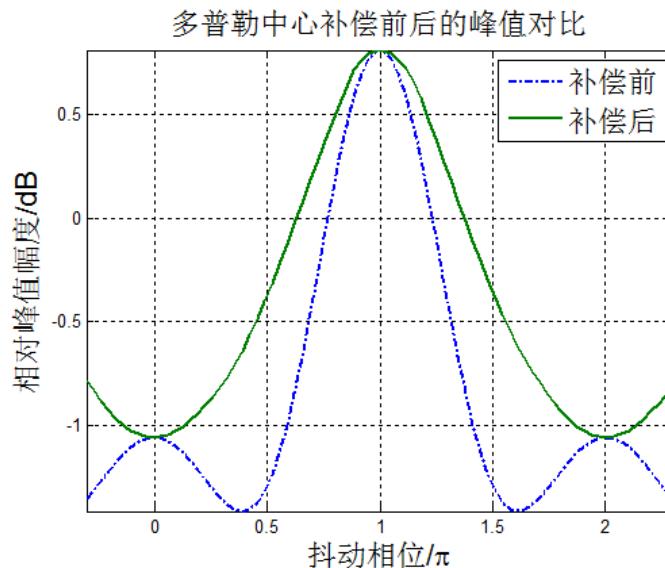


图 6-3 多普勒中心补偿的优化效果

成像峰值幅度的差距是照射时长的变化导致的，这点在第三章中已经说明。而照射时长随抖动相位周期变化，因此峰值幅度也随着抖动相位周期变化，如图 6-3 所示，经过多普勒中心（Doppler Centroid）调整之后，大部分点目标成像的峰值幅度都有所提高，但是最大和最小幅度之间还是有着显著的差距。有两种方法可以补偿这种幅度误差，一是根据抖动相位直接乘以不同的权值；一是做回波包络校正，类似高频抖动补偿的处理方法。在仅有低频抖动的情况下推荐使用第一种方法，因为这种方法的实现难度低，而且低频包络误差不会引起旁瓣畸变，完全可以不去校正。但是如果抖动中既有高频分量又有低频分量，则推荐使用第二种方法。本章仅介绍的一种方法，第二种方法留待下一章介绍。

经过幅度校正处理后，系统在不同抖动相位应当有相同的输出增益，因此需要做幅度校正。幅度校正权值随着抖动相位变化，我们将两者之间的关系定义为权值函数。权值函数会同时受到抖动幅度和频率的影响，变化关系如图 6-4 所示。

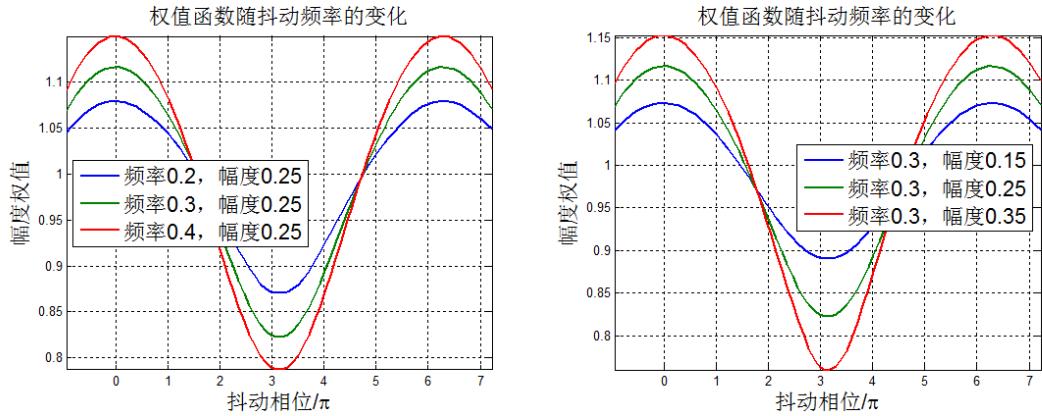


图 6-4 权值函数同时随抖动频率和幅度变化

经过多普勒中心调整和幅度校正两步处理之后，输出的成像质量会有显著的提升，整个低频补偿的实现过程如图 6-5 所示。

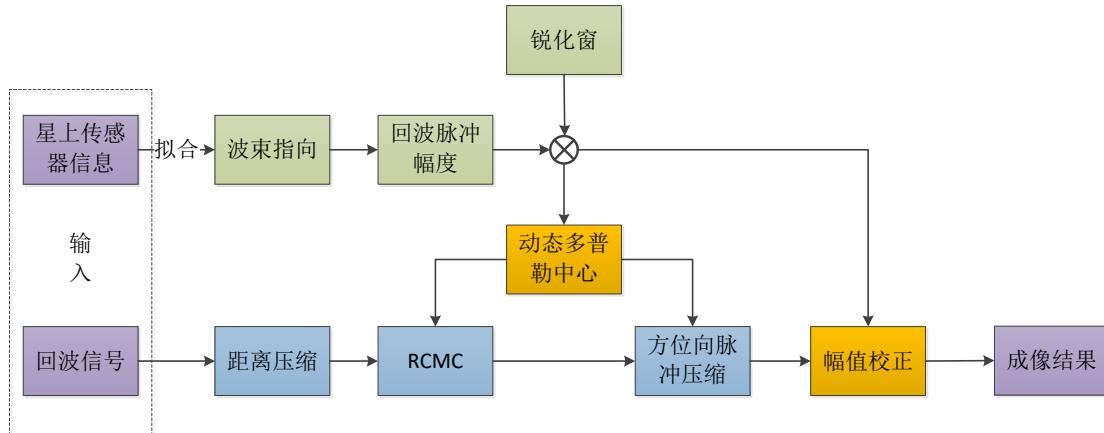


图 6-5 低频抖动补偿的基本框图

假设要对图像中某一点做补偿处理，首先从星上传感器数据中拟合得到波束指向，然后可以计算出该点被照射过程中的回波脉冲幅度变化。将回波幅度与锐化窗作卷积，得到的最大值位置对应了最佳多普勒中心，而最大值的幅度则可以用于幅值校正。将新的多普勒中心值用于 RCMC 和方位向脉冲压缩，最后经过幅值校正单元的加权，则可以得到该点的补偿成像结果。对于抖动模型比较简单的情况，比如说单频抖动，还可以提前计算幅度校正的权值和多普勒中心值，并建立查找表，只需要计算点目标所对应的抖动相位，即可得到多普勒校正中心值和幅度校正权值。

对单个点目标进行低频补偿的是实现难度相对容易，因为基于多普勒中心误差的补偿可以看作是 SAR 的斜视成像处理，或者是静态多普勒中心偏移补偿，

这是 SAR 处理中的最基本操作，有一套相对成熟的方法。但是如果需要对一个区域进行低频补偿却不是一件简单的事情，计算量过大仍然是算法实现中的最大问题。

为了降低算法计算量，也希望将抖动补偿的步骤尽量放在最后，但是因为在距离单元徙动校正中也需要动态地改变多普勒中心值，而 RCMC 和方位向脉冲压缩中都需要用到多普勒中心值。这就意味着补偿算法必须被应用在 RCMC 之前，而 RCMC 的插值的计算量恰好是 SAR 图像处理中运算量最大的步骤之一。即使是经过对算法执行顺序的优化之后，低频补偿的运算量仍然非常大，需要通过其他方法优化。

6.2.2 处理窗口的优化

在高频抖动的优化过程中已经提到过处理窗口的概念，以及增大处理窗口的代价问题（5.3.3）。调整处理窗口的优化方法也适用于低频补偿，通过这种有损的优化方法，可以大大提高补偿效率。为了确定处理窗口的大小，需要对处理窗口与成像损失之间的量化关系进行分析。

增大处理窗口，对每个处理窗口使用同样的多普勒偏移值和幅度校正值，造成的主要结果是不同相位的成像增益存在差异，如图 6-6 所示。虚线表示的是逐点成像的成像处理增益，对应不同相位的点目标若具有相同的回波反射率，则回波成像幅度相同；实线表示的是处理窗口为 $\pi/3$ 时候的成像情况。实验中的抖动参数为 [0.3, 0.25, 0, 0]。最明显的幅度畸变发生在处理窗口的边缘，此处点目标的成像幅度会发生跳变，如果这种跳变的幅度过大，会影响图像的解读。

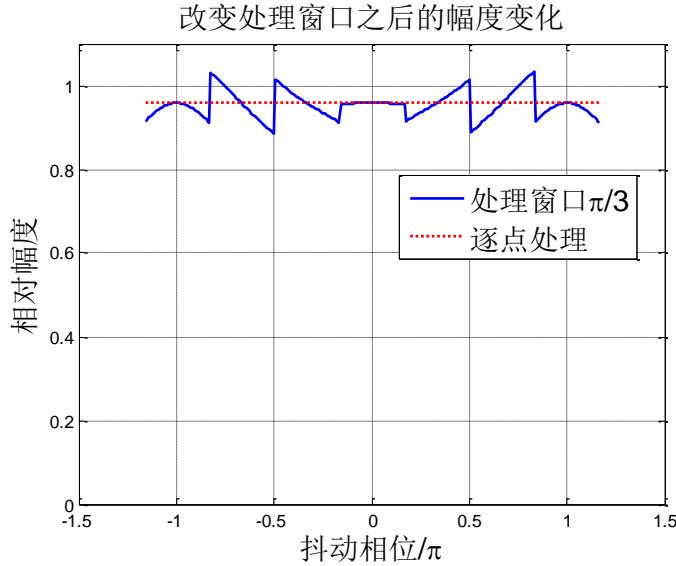


图 6-6 增大处理窗口之后的成像损失

为了选择合适的处理窗口大小，我们做了一组实验：逐渐减小处理窗口的大小，并记录从 $-\pi$ 到 π 的点目标成像中最大值和最小值的差距以及最大跳变值，并记录如图 6-7 所示。从图中看出，处理窗口长度与幅度畸变量两者之间有近似的线性关系。这组数据可以作为处理窗口选择的依据。

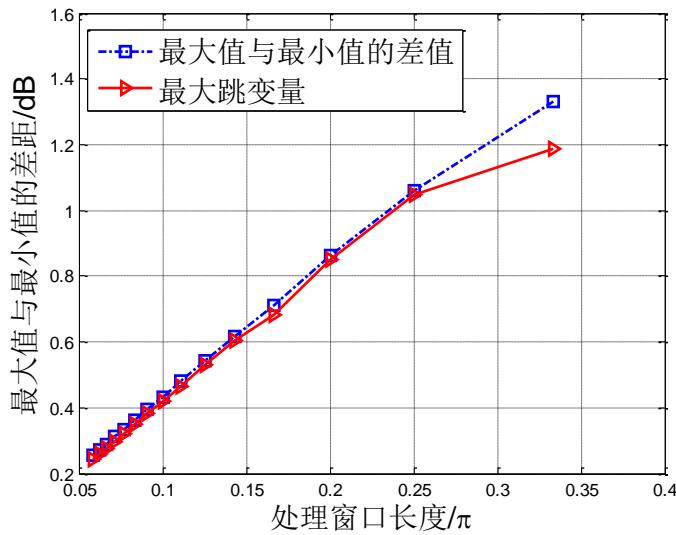


图 6-7 处理窗口大小与幅度畸变量

6.3 混合频率抖动的成像补偿算法

当抖动中仅包含低频抖动的时候，使用上文的抖动补偿方法即可得到理想的

结果，但是现实的情况下可能有高低频两种抖动同时存在。在这种情况下需要设计将以上两种补偿方法相结合。最便捷的方式是以高频抖动的包络畸变校正替代掉低频补偿中的幅度校正模块，因为包络校正本身就含有幅度校正的作用。这样，本文设计的针对高低频补偿的两种方法也可以同时用在对同一幅图像的补偿处理中，经过单次处理，消除掉低频和高频抖动对成像的影响。

除了明显可直接建模的波束指向误差之外，存在无规律的指向误差的回波信号也都可以用这种方法进行成像补偿。前提是能够通过星上运动传感器数据获得较为精确的波束指向数据。

6.3.1 算法实现

高低频综合补偿算法的算法基本流程如图 6-8 所示，需要在距离徙动校正和方位向脉冲压缩两步进行动态多普勒中心的调整，完成多普勒中心的优化。两步之间将信号切换到时域并进行包络畸变的校正，而低频抖动中的幅度校正也在高频补偿中同时进行。最终输出补偿后的成像结果。

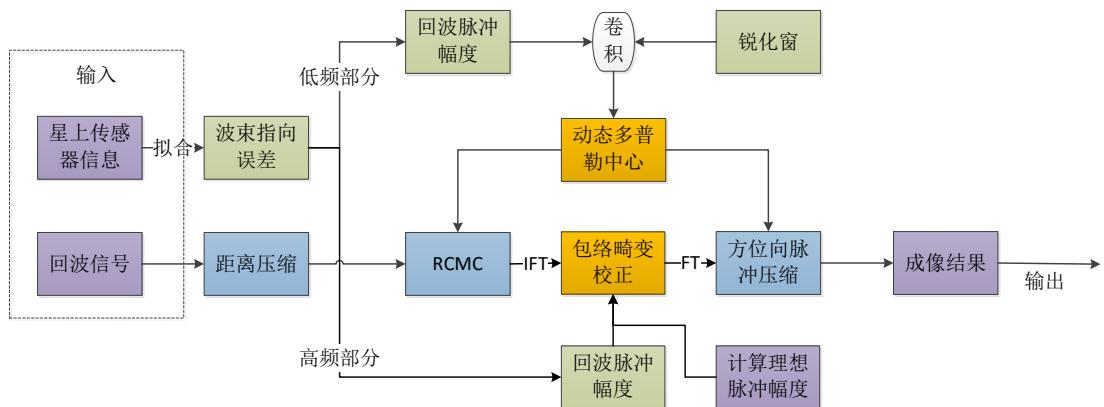


图 6-8 综合补偿算法流程图

6.3.2 仿真举例

对某一区域进行抖动成像和补偿的仿真，抖动中包含高频抖动($[8, 0.3, \pi/5, \pi/3]$)，同时包含一个低频抖动($[0.3, 0.15, \pi/2, 0]$)，以及一个标准差为 0.1 (相对幅角) 的随机抖动。

经过高频和低频的同时校正处理，得到最终的成像结果：

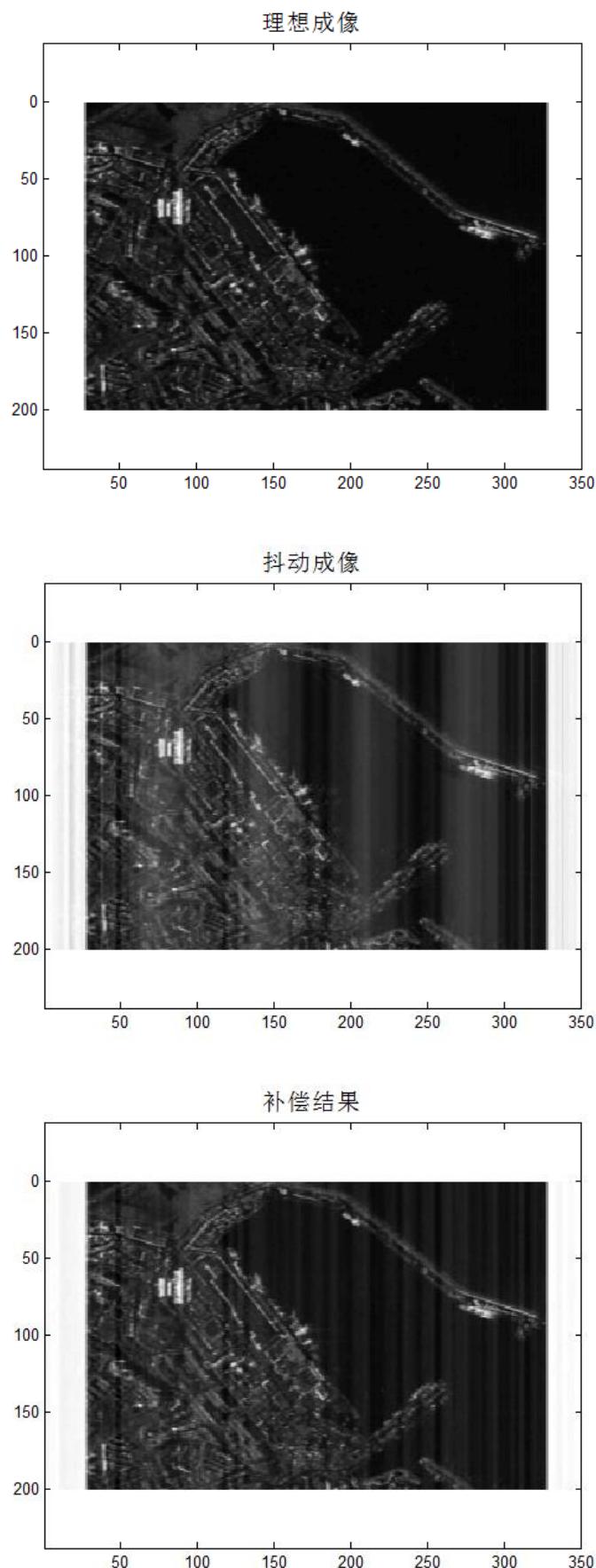


图 6-9 综合仿真实验

由于存在随机误差，最终的补偿结果中仍然存在垂直于方位向的、无规律的条纹，但是已经比抖动成像的实验结果好了很多。因为试验中包含了随机抖动，所以本文进行了多次试验，并记录实验输出的补偿前后还原度对比数据如表格 10 所示：

表格 10 补偿前后的图像还原度对比

	补偿前的图像还原度	相位畸变校正之后的图像还原度	MoCo-AADC 补偿后的图像还原度
第 1 次试验	0.9815	0.9815	0.9969
第 2 次试验	0.9848	0.9848	0.9963
第 3 次试验	0.9830	0.9830	0.9956
第 4 次试验	0.9802	0.9802	0.9946

6.4 补偿后的抖动阈值

在低频抖动补偿处理之前，最差信噪比的回波点位于 $\left(N + \frac{1}{2}\right) \cdot \pi$ 附近，经过多普勒中心的调整，这些点的成像信噪比都得到了明显的增强。这时候最差信噪比就落在了 $2N \cdot \pi$ 附近的区域。所以，补偿之后系统对抖动的阈值，也由这些点的成像损失来决定。

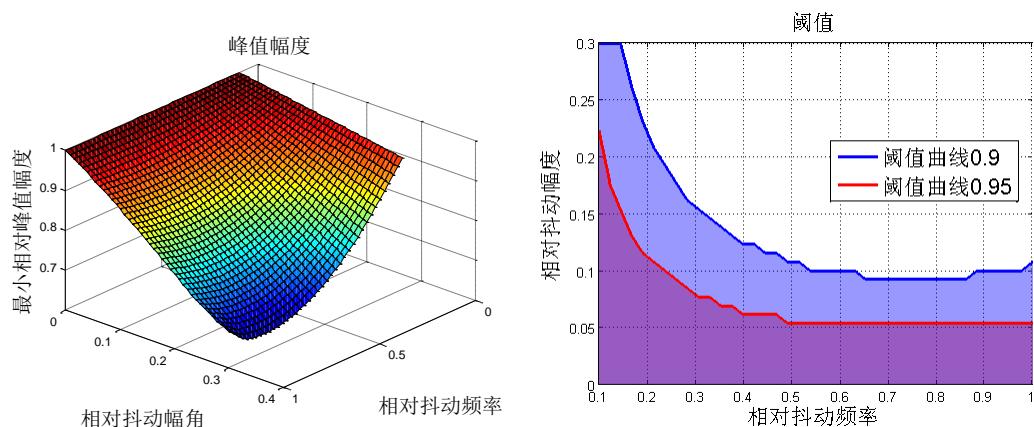


图 6-10 低频抖动中无法补偿的信噪比损失

与高频模型中相似，相位 $2N \cdot \pi$ 位置的无法补偿的信噪比损失的大小，与抖动的频率和幅度这两个因素都有关系。以最简单的单频方位向低频抖动为例，通过仿真得到对应不同频率和不同幅度的最大信噪比损失如图 14 所示，总体的规律是抖动频率越大，抖动幅度越大，则无法补偿的损失越大。例如，当相对抖动频率为 0.7，相对抖动幅度为 0.3，峰值幅度最大下降值为 3.7dB，这对成像结果会产生严重的影响。图 6-10 中部分数据如表格 11 所示。

表格 11 低频抖动中各相位的最小峰值幅度

	相对幅角	0.000	0.050	0.100	0.150	0.200	0.250	0.300	0.350
相对频率	幅角/°, 频率/Hz	0.000	0.015	0.031	0.046	0.062	0.077	0.093	0.108
0.100	0.261	1.000	0.989	0.977	0.966	0.954	0.942	0.930	0.918
0.200	0.522	1.000	0.978	0.955	0.932	0.909	0.885	0.862	0.838
0.300	0.783	1.000	0.968	0.935	0.901	0.867	0.833	0.800	0.767
0.400	1.044	1.000	0.959	0.917	0.874	0.831	0.789	0.747	0.707
0.500	1.305	1.000	0.953	0.904	0.853	0.803	0.753	0.705	0.659
0.600	1.566	1.000	0.949	0.894	0.838	0.782	0.727	0.674	0.623
0.700	1.827	1.000	0.946	0.889	0.830	0.770	0.711	0.653	0.599
0.800	2.088	1.000	0.947	0.889	0.828	0.767	0.705	0.645	0.588
0.900	2.349	1.000	0.949	0.893	0.834	0.773	0.711	0.649	0.606

6.5 本章小结

低频抖动的补偿基于成像处理中的动态多普勒中心调整，通过这种方式可以实现更高的回波信息利用效率和更高的成像信噪比。

多普勒中心调整之后能量利用效率提高了很多，但是不同相位的幅度差异依然存在。校正幅度差异有两种方法，一是直接加权，适用于只存在低频抖动的情况；二是幅度校正，在抖动情况复杂的情况下适用，本文对这两种方法都进行了说明和性能测试。

算法实现的计算量仍然是一个严重的问题，尤其是低频校正的计算量比高频的要大。本文给出了增大处理窗口的方式，可以提高算法的执行效率，不过这种优化会带来一定的成像损失，主要表现为窗口边缘的幅度跳变。对于这种幅度跳变本文也做了分析。对低频抖动的补偿算法也进行了仿真和性能分析，给出了点目标补偿的点目标性能增益并计算了补偿能力上限。

第七章 总结和展望

7.1 总结

轻型敏捷 SAR 卫星是近年来小卫星发展的一个研究热点，本篇论文的研究工作围绕成像抖动畸变的分析及补偿展开，重新建立了抖动畸变模型，分析了畸变的产生原因和特征，提出了抖动畸变规律和畸变补偿算法。论文的主要内容及研究成果如下：

抖动分析方面提出三种计算方法：

- a) 抖动参数与畸变性能的定量关系计算方法；
- b) 抖动阈值的精确计算方法；
- c) 抖动导致区域成像宏观畸变的评价方法。

畸变补偿方面提出两种补偿算法：

- a) 基于包络畸变校正的高频抖动补偿算法；
- b) 基于多普勒中心动态调整的低频抖动补偿算法。

7.2 研究展望

从轻敏 SAR 发展的实际需求出发，值得进一步研究的问题包括：

1、基于回波信息的抖动参数的拟合。在抖动补偿中，高频抖动中，指向角度的精确测量难度较高，但是如果抖动模型已知，可以根据回波信息估计抖动模型的参数。抖动参数估计有两种可行方案，一是根据特显点的旁瓣畸变，一是根据平稳回波区域的起伏畸变；

2、基于抖动畸变理论的卫星结构和姿控方案优化。本文提供了一套仿真系统，可以输入指向角历程，输出各种畸变参数。如果将该系统与卫星姿态控制与测量的仿真/模拟系统相结合，可以直接建立姿控和卫星结构等输入条件与图像畸变之间的关系。从而以图像畸变为目标，使用智能优化算法，改进卫星的结构

设计和姿控方案设计；

3、改进仿真系统，可以更贴近实际环境。本文建立的实验系统只能用于条带模式的分析，如果需要推广到聚束、Mosaic 等成像模式，还需要对系统进行一些修改。实验中主要考虑的是成像干扰，对噪声因素考虑的较少，加入更贴近实际的噪声模型之后，可以对补偿算法的信噪比性能进行更深入的分析。

参考文献

- [1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar[M]. John Wiley & Sons, 1991.
- [2] 李春升, 杨威, 王鹏波. 星载 SAR 成像处理算法综述[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 111-122.
- [3] Karjalainen M. Multidimensional SAR satellite images—A mapping perspective[D]. Aalto University, 2010.
- [4] Marino A, Walker N, and Woodhouse I. Ship detection with Radarsat-2 Quad-Pol SAR data using a Notch filter based on perturbation analysis[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hawaii, IEEE Press, 2010: 3704-3707.
- [5] Migliaccio M, Gambardella A, Nunziata F, et al.. ALOSPALSAR Polarimetric SAR data to observe sea oil slicks[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, South Africa, IEEE Press, 2009: 669-672.
- [6] 刘朋. SAR 海面溢油检测与识别方法研究[D]. 中国海洋大学, 2012.
- [7] Margarit G, Malloriqui J J, and Pipia L. Polarimetric characterization and temporal stability analysis of urban target scattering[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2038-2048.
- [8] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1-10.
- [9] Aguttes J P. High resolution (metric) SAR microsatellite, based on the CNES MYRIADE bus[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International. IEEE, 2001, 1: 224-226.
- [10] 朱良, 郭巍, 禹卫东. 合成孔径雷达卫星发展历程及趋势分析[J]. 现代雷达, 2009 (4): 5-10.
- [11] Edmonson W, Chenou J, Neogi N, et al. Small satellite systems design methodology: A formal and agile design process[C]//Systems Conference (SysCon), 2014 8th Annual IEEE. IEEE, 2014: 518-524.
- [12] Yuan Z, Chen Y, He R. Agile earth observing satellites mission planning using genetic algorithm based on high quality initial solutions[C]//Evolutionary Computation (CEC), 2014 IEEE Congress on. IEEE, 2014: 603-609.
- [13] Tu T M, Huang P S, Hung C L, et al. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral adjustment for IKONOS imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2004, 1(4): 309-312.
- [14] Mumby P J, Edwards A J. Mapping marine environments with IKONOS imagery: enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy[J]. Remote sensing of Environment, 2002, 82(2): 248-257.
- [15] YANG Z, KANG J, ZHAO G. Renewing urban large-scale topographic maps by using Quick

- Bird panchromatic remote sensing images [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 2: 009.
- [16] Fappani D, Ducollet H. Manufacturing and control of the aspherical mirrors for the telescope of the French satellite Pleiades[C]//Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2007: 66870T-66870T-11.
- [17] Gleyzes M A, Perret L, Kubik P. Pleiades system architecture and main performances[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, 39: B1.
- [18] Srinivasan T P, Islam B, Singh S K, et al. In-Flight Geometric Calibration-An Experience With CARTOSAT-1 and CARTOSAT-2[J]. Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Control and Spatial Information Sciences, 2008, 37.
- [19] 梁巍, 周润松. 国外侦察卫星最新进展[J]. 航天器工程, 2008, 16(2): 30-40
- [20] 朱贵伟. 2013 年国外军事航天回顾[J]. 国际太空, 2014 (2).
- [21] Naftaly U, Levy-Nathansohn R. Overview of the TECSAR satellite hardware and mosaic mode[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2008, 5(3): 423-426.
- [22] Sharay Y, Naftaly U. TECSAR: design considerations and programme status[C]//Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings-. IET, 2006, 153(2): 117-121.
- [23] Naftaly U, Oron O. TECSAR—Program status[C]//Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems (COMCAS), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 1-4.
- [24] 吴技. 国外航天侦察系统的现状与发展[J]. 电讯技术, 2009, 49(5): 108-114.
- [25] Levy-Nathansohn R, Naftaly U. Overview of the TECSAR satellite modes of operation[J]. EUSAR 2006, 2006.
- [26] 孙佳. 以色列首颗雷达成像侦察卫星简介[J]. 国际太空, 2008, 8: 010.
- [27] Martin M, Klupar P, Kilberg S, et al. TechSat 21 and revolutionizing space missions using microsatellites[J]. 2001.
- [28] Wahl T, Høye G K, Lyngvi A, et al. New possible roles of small satellites in maritime surveillance[J]. Acta Astronautica, 2005, 56(1): 273-277.
- [29] Braun H M, Knobloch P E. SAR on small satellites shown on the SAR-lupe example[C]//Proceedings of the International Radar Symposium. 2007: 5-7.
- [30] Keydel W. Perspectives and visions for future SAR systems[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(3): 97-103.
- [31] 肖择. 德启用卢皮 (SAR-Lupe) 合成孔径雷达卫星监视系统[J]. 上海航天, 2008 (6).
- [32] 匡燕, 李安, 李子扬, 等. RADARSAT 卫星产品[J]. 遥感信息, 2007 (2): 82-85.
- [33] 陈旸. RADARSAT-2 的关键技术及军民应用研究[J]. 无线电工程, 2008, 37(6): 40-42.
- [34] Craig R, Beavis R C. TANDEM: matching proteins with tandem mass spectra[J]. Bioinformatics, 2004, 20(9): 1466-1467.

- [35] Covello F, Battazza F, Coletta A, et al. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth[J]. *Journal of Geodynamics*, 2010, 49(3): 171-180.
- [36] Bovenga F, Wasowski J, Nitti D O, et al. Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 272-285.
- [37] Hasegawa H. A semi-automatic road extraction method for ALOS satellite imagery[C]//Proceedings of ISPRS Congress, Istanbul, Turkey. 2004, 35: 303.
- [38] ZHANG R, LIU S, ZHOU L, et al. AN EMPIRICAL RESEARCH ON ANALYSIS AND PRE-PROCESSING OF ALOS SATELLITE IMAGES [J][J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 3: 019.
- [39] Werninghaus R, Buckreuss S. The TerraSAR-X mission and system design[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2010, 48(2): 606-614.
- [40] Krieger G, Moreira A, Fiedler H, et al. TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2007, 45(11): 3317-3341.
- [41] Moreira A, Krieger G, Hajnsek I, et al. TanDEM-X: a TerraSAR-X add-on satellite for single-pass SAR interferometry[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International. IEEE, 2004, 2: 1000-1003.
- [42] Covello F, Battazza F, Coletta A, et al. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth[J]. *Journal of Geodynamics*, 2010, 49(3): 171-180.
- [43] Covello F, Battazza F, Coletta A, et al. COSMO-SkyMed mission status: Three out of four satellites in orbit[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009. IEEE, 2009, 2: II-773-II-776.
- [44] Kimura H, Ito N. ALOS/PALSAR: The Japanese second-generation spaceborne SAR and its applications[C]//Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space. International Society for Optics and Photonics, 2000: 110-119.
- [45] Lo Y T, Lee S W. *Antenna Handbook: theory, applications, and design*[M]. Springer Science & Business Media, 2013.
- [46] Dreizin S, Sharay Y, Isman N. High Accuracy Horizontal Scanner operating in X band for the Measurement of a spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Antenna[J]. 2004.
- [47] 朱迅, 许越宁. 某雷达轻质碳纤维天线结构设计[J]. 纤维复合材料, 2010, 3: 005.
- [48] 林来兴. 小卫星技术的发展和应用前景[J]. 中国航天, 2007 (11): 43-47.
- [49] 王继学. 星载合成孔径雷达天线的现状与发展[J]. 上海航天, 2001, 18(6): 50-57.
- [50] Jones W L, Schroeder L C, Boggs D H, et al. The SEASAT - A satellite scatterometer: The geophysical evaluation of remotely sensed wind vectors over the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1982, 87(C5): 3297-3317.

- [51] 陈颖颖, 吴彦鸿, 贾鑫. 对不同工作模式星载合成孔径雷达的侦察研究[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(12).
- [52] Dare P, Dowman I. An improved model for automatic feature-based registration of SAR and SPOT images[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 56(1): 13-28.
- [53] 刘寒艳, 宋红军, 程增菊. 条带模式, 聚束模式和滑动聚束模式的比较[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(3): 410-417.
- [54] 韩晓磊, 李世强, 王宇, 等. 基于敏捷卫星平台的星载 SAR Mosaic 模式研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(7): 971-979.
- [55] Shimada M, Ohtaki T. Generating large-scale high-quality SAR mosaic datasets: Application to PALSAR data for global monitoring[J]. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of, 2010, 3(4): 637-656.
- [56] 王威, 刘中伟, 宋小全, 等. 星载 Mosaic 模式 SAR 成像算法研究[J]. 飞行器测控学报, 2013 (2): 182-187.
- [57] 王威. 星载 Mosaic 模式 SAR 系统关键参数设计[J]. 测绘通报, 2015 (S1): 25-29.
- [58] Mittermayer J, Lord R, Borner E. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm[C]//INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM. 2003, 3: III: 1462-1464.
- [59] Prats P, Scheiber R, Mittermayer J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2010, 48(2): 770-780.
- [60] 唐禹, 王岩飞, 张冰尘. 滑动聚束 SAR 成像模式研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 26-29.
- [61] Matsumoto S, Ohkami Y, Wakabayashi Y, et al. Satellite capturing strategy using agile orbital servicing vehicle, Hyper-OSV[C]//Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on. IEEE, 2002, 3: 2309-2314.
- [62] Tavani M, Barbiellini G, Argan A, et al. The AGILE space mission[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008, 588(1): 52-62.
- [63] Cebrowski A K, Raymond J W. Operationally responsive space: A new defense business model[R]. ARMY WAR COLL CARLISLE BARRACKS PA, 2005.
- [64] Rao A V, Scherich A E, Cox S, et al. A concept for operationally responsive space mission planning using aeroassisted orbital transfer[C]//2008 Responsive Space Conference. 2008.
- [65] Doggrell L. Operationally responsive space: a vision for the future of military space[J]. Air & Space Power Journal, 2006, 20(2): 42.
- [66] 王峰, 叶水驰, 曹喜滨. 快速响应对地观测小卫星发展现状及趋势[C]//中国空间科学学会 2013 年空间光学与机电技术研讨会会议论文集. 2013.

- [67] Doyne T, Wegner P, Olmedo C, et al. ORS and TacSat Activities Including the Emerging ORS Enterprise[C]//Proc. of the 5th Responsive Space Conference. 2007.
- [68] DeFlorio S, Zehetbauer T, Neff T. Optimal operations planning for SAR satellite constellations in low earth orbit[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations (ESA-ESOC). 2005: 14-17.
- [69] Sandau R. Distributed satellite systems for earth observation and surveillance[J]. RTO Lecture Series, volume RTO-EN-SCI-209, 2009.
- [70] Gan K L, Zhou M W, Ge S M, et al. Modeling and attitude control of satellite with dual axis solar array actuator[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17: 82-87.
- [71] Arikawa Y, Saruwatari H, Hatooka Y, et al. ALOS-2 launch and early orbit operation result[C]//IGARSS. 2014: 3406-3409.
- [72] Runge H, by Institutions F A Q. An interferometric SAR satellite mission[J]. 2003.
- [73] Iwata T, Matsumoto K, Hoshino H. Thermally Induced Dynamics of Large Solar Array Paddle from Laboratory Experiment to Flight Date Analysis[C]. AIAA Guidance Navigation and Control Conference. Portland, Oregon, 2011
- [74] 庞世伟, 杨雷, 曲广吉. 高精度航天器微振动建模与评估技术最近进展[J]. 强度与环境, 2007, 34(6): 1-9.
- [75] C. E. Eyerman , J. F. Shea. A systems engineering approach to disturbance minimization for spacecraft utilizing controlled structures technology[R]. MIT SERC Report#2-90, 1990.
- [76] J. W. Melody. Discrete-frequency and broadband reaction wheel disturbance models[J]. Interoffice Memorandum 3411-95-200csi, JPL June 1995.
- [77] Iwasaki A. Detection and estimation satellite attitude jitter using remote sensing imagery[J]. Advances in Spacecraft Technologies, 2011, 13: 257-272.
- [78] Schneider M, Lehner M, Müller R, et al. Stereo evaluation of ALOS/PRISM data on ESA-AO test sites: First DLR results[C]//Proc. ALOS PI Symp. 2008.
- [79] Tong X, Ye Z, Xu Y, et al. Framework of jitter detection and compensation for high resolution satellites[J]. Remote Sensing, 2014, 6(5): 3944-3964.
- [80] Wang P, An W, Deng X, et al. A jitter compensation method for spaceborne line-array imagery using compressive sampling[J]. Remote Sensing Letters, 2015, 6(7): 558-567.
- [81] B. Bialke. A compilation of reaction wheel induced spacecraft disturbances[C]. Proceedings of the 20th Annual AAS Guidance and Control Conference, 1997.
- [82] R. Masterson. Development and validation of empirical and analytical reaction wheel disturbance models[D]. Master's thesis, MIT 1999.
- [83] 叶东. 敏捷卫星姿态快速机动与稳定控制方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [84] 侯志立. 挠性卫星快速姿态机动与指向跟踪控制方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [85] 白圣建. 挠性航天器的刚柔耦合动力学建模与姿态控制 [D][D]. 国防科学技术大学,

- [86] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar- Signal processing algorithms(Book)[J]. Norwood, MA: Artech House, 1995., 1995.
- [87] Farrel J L. Effect of navigation errors in maneuvering SAR[J]. IEEE Trans.Aeros. and Electro. Syst., 1973, 9(5): 750-776.
- [88] Stevens D R, Cumming I G, Gray A L. Options for airborne interferometric SAR motion compensation[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 1995, 33(2): 409-420.
- [89] Fornaro G, Franceschetti G, Perna S. Motion compensation errors: effects on the accuracy of airborne SAR images[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2005, 41(4): 1338-1352.
- [90] Reigber A, Moreira A. First demonstration of airborne SAR tomography using multibaseline L-band data[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2000, 38(5): 2142-2152.
- [91] De Macedo K A C, Scheiber R, Moreira A. An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2008, 46(10): 3151-3162.
- [92] Zhou F, Wu R, Xing M, et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation[J]. Radar, Sonar & Navigation, IET, 2007, 1(1): 59-66.
- [93] Guo Z Y, Lin Y, Tan W X, et al. Circular SAR motion compensation using trilateration and phase correction[C]//Radar Conference 2013, IET International. IET, 2013: 1-5.
- [94] Kanoto M, Toyoguchi Y, Hosoya T, et al. Visualization of the trochlear nerve in the cistern with use of high-resolution turbo spin-echo multislice motion-sensitized driven equilibrium[J]. American Journal of Neuroradiology, 2013, 34(7): 1434-1437.
- [95] Kirk J C. Motion compensation for SAR[J]. IEEE Trans. Aeros. and Electro. Syst., 1975, 11(3): 338-348.
- [96] 李燕平. 单/双基 SAR 成像和运动补偿研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- [97] Moreira J R. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time motion compensation [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1990, 28(4): 620-626.
- [98] Multiscale local Map-Drift-Driven multi alteration SAR autofocus using fast platform at image synthesis [J]. IEEE Trans on GRS, Oct., 2011, 49(10): 3730-3736.
- [99] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia and C. V. Jakowatz. Phase Gradient Autofocus—A Robust Tool for High Resolution Phase Correction [J]. IEEE Trans on AES, July, 1994, Vol. 30(3): 827–835.
- [100] W. Ye, T. S. Yeo and Z Bao. Weighted Least-Squares Estimation of Phase Errors for SAR/ISAR Autofocus [J]. IEEE Trans on GRS, September, 1999, Vol.37(5):2487-2494.
- [101] H. L. Chan and T. S. Yeo. Noniterative quality phase-gradient autofocus (QPGA)

- algorithm for spotlight SAR imagery [J]. IEEE Trans on GRS, Sep. 1998, 36(5):1531-1539.
- [102] Zhu D, Jiang R, Mao X, et al. Multi-subaperture PGA for SAR autofocusing[J]. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 2013, 49(1): 468-488.
- [103] Li J, Chen J, Liu W, et al. A Synthetic Bandwidth Method for High-Resolution SAR Based on PGA in the Range Dimension[J]. Sensors, 2015, 15(7): 15339-15362.
- [104] Gungor A, Cetin M, Guven H E. An Augmented Lagrangian Method for autofocused Compressed SAR Imaging[C]//Compressed Sensing Theory and its Applications to Radar, Sonar and Remote Sensing (CoSeRa), 2015 3rd International Workshop on. IEEE, 2015: 1-5.
- [105] Li N, Wang R, Deng Y, et al. Extension and Evaluation of PGA in ScanSAR Mode using Full-Aperture Approach[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2015, 12(4): 870-874.
- [106] X. Li, G. S. Liu and J. L.Ni. Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization [J]. IEEE Trans on AES, Oct. 1999, 35(4): 1240-1251.
- [107] Wang. J, Liu, X and Zhou, Z.. Minimum-entropy phase adjustment for ISAR [J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., Aug. 2005, 152(2): 58-67.
- [108] Xiong T, Xing M, Wang Y, et al. Minimum-entropy-based autofocus algorithm for sar data using chebyshev approximation and method of series reversion, and its implementation in a data processor[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2014, 52(3): 1719-1728.
- [109] Zeng T, Wang R, Li F. Sar image autofocus utilizing minimum-entropy criterion[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2013, 10(6): 1552-1556.
- [110] Thomas Kragh J., Alaa Kharbouch A. Monotonic iterative algorithm for minimum-entropy autofocus [C]. IEEE International Conference on Image Processing, Atlanta, pp:645-648, 2006.
- [111] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation[M]. Artech house, 2005.
- [112] 魏钟铨. 合成孔径雷达原理[M] . 北京: 科学出版社, 2001.
- [113] Wu Y, Liu Y. Standard Smith chart approach to solve exponential tapered nonuniform transmission line problems[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2008, 22(11-12): 1639-1646.
- [114] Neo Y L, Wong F, Cumming I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93.
- [115] Sheng H, Zhu B, Gao Y, et al. Complex target-induced azimuth envelope reconstruction from SAR RAW data[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International. IEEE, 2014: 1753-1756.
- [116] Pelich R, Longepe N, Mercies G, et al. Refocusing of ship signatures and Azimuth

- speed estimation based on FRFT and SAR SLC imagery[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International. IEEE, 2015: 3699-3702.
- [117] Xiaohong L, Peiguo L, Guoyi X. Fast generation Of SAR deceptive jamming signal based on inverse Range Doppler algorithm[C]//Radar Conference 2013, IET International. IET, 2013: 1-4.
- [118] Esteban Fernández D, Meadows P, Schaettler B, et al. ERS attitude errors and its impact on the processing of SAR data[C]//SAR workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites. 2000, 450: 597.
- [119] Olivier P. Analytical formulation of the Doppler parameters for spaceborne SAR processing[C]//IGARSS'91; Proceedings of the 11th Annual International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1991, 1: 1051-1054.
- [120] Rosich B, Meadows P, Schättler B, et al. The ers-2 monogyro and extra backup piloting modes: impact on sar performance[C]//CEOS SAR Workshop. 2001.
- [121] Dragosevic M. On accuracy of attitude estimation and Doppler tracking[C]//SAR workshop: CEOS Committee on Earth Observation Satellites. 2000, 450: 127.
- [122] Rosich B, Esteban D, Emiliani G, et al. Assessment of the new ERS-2 mono-gyro piloting mode on the quality of ERS SAR data and ERS SAR applications performance[J]. ISLR [dB], 2000, 8: 9.5.
- [123] Marechal N. High frequency phase errors in SAR imagery and implications for autofocus[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS'96.'Remote Sensing for a Sustainable Future.', International. IEEE, 1996, 2: 1233-1240.
- [124] 陈杰, 周荫清, 李春升. 合成孔径雷达卫星姿态指向稳定度与图像质量关系的研究[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1785-1789.
- [125] 陈杰, 陈元藻. 卫星姿态指向抖动与 SAR 成像质量关系研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(5): 518-521.
- [126] 王鹏波, 周荫清, 陈杰, 等. 姿态指向稳定度对聚束 SAR 成像的影响[J]. 现代雷达, 2007, 29(8): 18-21.
- [127] 王鹏波, 周荫清, 陈杰, 等. 天线指向抖动对聚束 SAR 成像质量的影响[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(5): 293-296.
- [128] 吴越, 李春升, 王鹏波, 等. 天线波束指向控制对 TOPSAR 成像质量的影响[J]. 宇航学报, 2012, 33(4): 487-491.
- [129] 黄岩, 李春升, 陈杰, 等. 星载 SAR 天线指向稳定度对成像质量的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 282-285.
- [130] 匡辉, 陈杰, 杨威, 等. 多通道星载合成孔径雷达姿态误差影响分析与补偿[J]. 电波科学学报, 2014, 29(006): 1070-1075.
- [131] Giudici D, Aria D D, Bazzoni A, et al. Analysis of antenna pointing errors on SAR image quality[C]//Radar Conference, 2008. RADAR'08. IEEE. IEEE, 2008: 1-6.

- [132] Ni C, Wang Y F, Xu X H, et al. SAR motion compensation based on the correction of residual attitude errors[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2011, 54(10): 1899-1905.
- [133] Neo Y L, Wong F H, Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm[J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2008, 46(1): 14-21.
- [134] R.K.Raney. Radar Fundamentals: Technical Perspective. In *Manual of Remote Sensing, Volume 2: Principles and Applications of Imaging Radar*. F.M. Henderson and A. J. Lewis (ed.) pp. 9-130. John Wiley & Sons. New York, 3rd edition, 1998.
- [135] Gou Yong-mei, Chen Hao, and Hong Wen, et al. Resample in the first order motion compensation of realtime SAR processor[C]. *ICSP2000 Proc., Beijing, China*, 2000, 3: 1830-1833.
- [136] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. *Spotlight SAR: Signal Processing Algorithms*[M]. Boston, Artech House, 1995, Chapter 5.
- [137] Eldhuset K. Accurate attitude estimation using ERS-1 SAR raw data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(14): 2827-2844.

攻读博士期间发表论文目录

- [1]. Yan Pang, Mo Huang, Rui Zhang, Xuwen Liang. A method to estimate the effects of the antenna jitters of an agile SAR satellite on the appearance of the images.[J]. Journal of Computational Information Systems 2014, 10(10): 4319-4330. (已发表)
- [2]. Yan Pang, Xuwen Liang, Rui Zhang. Analysis and Compensation for the Imagery Distortion of an Agile SAR System Due to the LOS Jitters.[J]. Journal of the Balkan Tribological Association 2016, 22. (已录用)
- [3]. Pang Yan, Ren Qianyi, Gong Wenbin, Liang Xuwen, Inter-satellite Accurate Ranging Based on Carrier Phase[C], 4th International Conference on Communications, Mobility, and Computing(会议论文集)
- [4]. 王斌, 庞岩, 刘会杰. 导航信号有害波形检测技术研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(7): 1713-1717.(第二作者, 已发表)
- [5]. Yan Pang, Xuwen Liang, Rui Zhang. A Jitter Compensation Method for Space-borne SAR Imagery. [J]. Remote Sensing. (审稿中)

作者简历

姓 名：庞岩

性 别：男

出 生 地：山东省聊城市

出生年月：1987 年 9 月

学习经历：

2004 年 9 月～2008 年 6 月 上海交通大学材料科学与工程学院

专业方向：材料学，获得工学学士学位

2008 年 9 月～2016 年 4 月 中科院上海微系统与信息技术研究所

专业方向：通信与信息系统（硕博连读），攻读博士学位

参与课题情况：

2009 年 9 月-2010 年 6 月 导航卫星星间链路优化

结合 Walker 星座几何构型，以及星间测距和通信的需求，对星间链路类型与通信、测距性能之间的关系进行分析，提出一种优化导航卫星之间的建立链接的窗口和路由通信的方法。

2010 年 12 月-2014 年 6 月 轻型敏捷 SAR 卫星高分辨率成像的预先研究

在轻型敏捷卫星的特殊背景下，研究制约卫星成像精度的因素，并尝试通过运动补偿处理的方法实现系统性能的提高。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学 位 论 文 独 创 性 声 明

本人声明所呈交的学位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，也不包含为获得中国科学院上海微系统与信息技术研究所或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一起工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: _____ 日 期: _____

中国科学院上海微系统与信息技术研究所

学 位 论 文 使 用 授 权 声 明

本人完全了解中国科学院上海微系统与信息技术研究所有关保留、使用学位论文的规定，即研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。保密的论文在解密后遵守此规定。论文的公布（包括刊登）授权中国科学院上海微系统与信息技术研究所人才教育处。

研究生签名: _____ 导师签名: _____ 日 期: _____