分类号	密级
UDC	编号编

中国科学院研究生院

硕士学位论文

<u>干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与</u> <u>应用</u>

<u>白 俊</u>

指导教师	普林特	副研究员	博士
	中国科	学院自动化	研究所
申请学位级别	_工学硕士_	学科专业名和	称 <u>模式识别与智能系统</u>
论文提交日期	ì	论文答辩日其	朝
培养单位	· F	国科学院自	动化研究所
学位授予单位	中国	科学院研究	【生院

答辩委员会主席_____

Research and Application of PS InSAR and cross-interferometry

Thesis Submitted to

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences

in partial fulfillment of the requirements

for the degree of

Master of Engineering

by

Jun Bai

Pattern Recognition and Intelligent Systems

Thesis Supervisor: Veronique Prinet

独创性声明

本人声明所成交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我 所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研 究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确地说明并表示 了谢意。

签名:_____日期:____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国科学院自动化研究所有关保留、使用学位论文的规定,即: 中国科学院自动化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。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名:______导师签名:_____日 期:_____日

摘要

干涉合成孔径雷达 (InSAR) 是二十世纪九十年代迅速发展起来的一门新兴的遥感技术,成功地应用于地形测绘与地表形变监测。特别是进入二十一世纪初期,永久散射体技术 (PSInSAR) 的出现以及 ENVISAT 卫星的发射成功,给 InSAR 领域带来新的挑战和新的问题。虽然 PS 技术和其它技术相比表现出了 巨大的潜力和众多的优势,我们必须进行更多的研究工作,以便使它上升到一个 更高的可操作层次。

本文首先分析了 InSAR 处理的一些基本原理。接下来研究当前 InSAR 领域的一些前沿话题,即永久散射体技术 (Permanent Scatters SAR Interferometry, PSInSAR) 和 ERS 与 ENVISAT 间的交叉干涉。本文的主要工作和贡献可以概括如下:

1. 方位向滤波算法的实现: 在对 InSAR 处理的一般原理的介绍之后,我 们重点分析了多普勒去相关现象。我们指出主、辅图像间多普勒质心差导致了干 涉图像的多普勒去相关,而解决这一问题的方法是进行滤波处理。本文实现了去 除多普勒去相关的方位向滤波算法,并且最后用实验结果验证了滤波后相干性的 提高。

2. 永久散射体技术 (PSInSAR) 的研究和应用: 第三章首先指出了现有 PS 点选择方法的不足之处, 在此基础上我们提出了一种新的自适应滤波算法, 不依赖于特定的数据集。接下来我们介绍了用以求解地表形变速度的一般相位模型。我们经过分析指出该模型具有多个解; 为了解决这个问题, 我们对己有的最优化算法进行了改进。我们将本章提出的算法应用到北京地区的 13 幅 ERS 图像中,时间为从 1995 年到 1999 年。在进行了一系列处理后, 我们得出了沉降结果。在缺少北京地区实际的沉降数据的前提下, 我们尚未验证结果的正确性。然而在最后, 我们给出了用现有的不同 PS 点检测方法求得的沉降结果的比较。

3. ERS-ENVISAT 交叉干涉技术的研究: 第四章介绍了 ERS-ENVISAT 交 叉干涉的理论基础。在交叉干涉中存在着两个主要的问题: 1) ERS 和 ENVISAT 图像的分辨率有所不同; 2) SAR 干涉的核心方程中将引入新的一项相应于两幅 图像不同的分辨率,而这一项需要在获得"规范化"的干涉图之前进行去除。第 一个问题给生成干涉图之前的配准带来了复杂性;为了解决这个问题,我们在已 有的配准算法基础上提出了适用于它们之间的配准算法。最后,我们把 ERS-ENVISAT 交叉干涉技术和 PS 技术联系起来,简单地介绍了 ERS-ENVISAT 图像序列中的永久散射体连续性问题。实验结果表明了我们的算法的有效性。 关键词:图像处理;干涉雷达;滤波;久散射体;地表沉降;城市应用;ERS; ENVISAT;交叉干涉

ABSTRACT

Within a decade, Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) has matured to a widely used geodetic technique for measuring the topography of a surface, its changes over time, and other changes of the Earth's surface. Especially at the beginning of the 21st century, with the development of the Permanent Scatters technique (PSInSAR) and the successful launch of ENVISAT satellite, InSAR technique brought new challenges and new problems to be solved. Although PS InSAR technique has demonstrated huge potentials and many advantages over other techniques, more research work need to be carried out before it can reach an operational level.

This Master thesis introduces at first the basic principles of InSAR processing, and ends with the study of some of the most advanced topics in the InSAR domain to date, that is, *PS technique* and *cross-interferometry*. The main work and contributions of this Master thesis can be summarized as the follows:

1. **Implementation of Azimuth Filtering:** After a general description of Insar processing principles, we focus on the analysis on the Doppler Shift Phenomenon (Chapter 2). We point out that the difference of Doppler Centroid results in a decorrelation effect, and that this problem is to be solved by filtering processing. We have implemented the Azimuth Filtering algorithm and demonstrate on real images the improvement of the correlation after filtering.

2. PS selection and algorithmic techniques: The Chapter 3 first points out the lack and insufficiencies of existing PS selection methods; we thus propose a new adaptive threshold approach, able to cope with any dataset. In a second part of the Chapter, we introduce the commonly accepted analytical model of the phase measurement to retrieve the LOS (Line of Sight) velocity. We show that the system has multiple solutions; to overcome this problem, we developed an original optimization framework. The new PS technique as proposed in this Chapter has been applied to a set of ERS images covering Beijing area between 1995 and 1999. The subsidence rate has been estimated but could not be validated due to a lack of ground truth data. However, a comparison is made between the LOS velocity results obtained from different PS selection algorithms.

3. ERS-ENVISAT cross-interferometry: The theoretical basis of

ERS-ENVISAT images cross-interferometry are presented in Chapter 4. Two difficulties raised by cross-interferometry are exposed in details: i) due to the difference of the signal wave lengths, the images pixel resolution is not identical in ERS and ENVISAT images ; ii) the phase difference equation, at the core of the interferometry technique, is augmented with an additional phase shift term, which needs to be removed before retrieving a "normal" interferogram. The first problem can introduce complication at the stage of image co-registration that generates the interferogram; to cope with this, we propose an efficient co-registration scheme, which is a generalization of existing methods. At last, we establish the relationship between the PS technique and the cross-interferometry, giving a brief introduction on PS continuity in ERS and ENVISAT image series.

KEYWORDS: Image processing, Interferometry Radar, Filtering, Permanent Scatters, Cross-interferometry, Terrain subsidence, Urban applications, Remote sensing, ERS, ENVISAT.

目录

第一章 概述	1
1.1 选题背景与意义	1
1.2 国内外研究概况	2
1.3 本文主要结构和贡献	4
第二章 SAR 干涉理论与处理技术	5
2.1 InSAR 的应用	5
2.2 SAR 干涉基本原理	7
2.2.1 几何表示 2.2.2 矢量表示 2.2.3 InSAR 处理流程	7 8 9
2.3 干涉处理算法	10
 2.3.1干涉复图像的配准 2.3.2干涉复图像重采样与干涉图的生成 2.3.3平地效应的消除 2.3.4地理编码 2.3.5差分干涉处理技术 	10 13 15 17 19
2.4 干涉 SAR 图像方位向滤波及实现	24
 2.4.1频谱偏移现象及原理 2.4.2 由多普勒效应带来的方位向频移 2.4.3 方位向滤波的算法及实现 2.4.4 实验结果及分析 	24 26 28 30
第三章 永久散射体技术	35
3.1 基本理论	35
3.1.1 相位模型的建立 3.1.2 PS 处理的主要过程	36 38
3.2 PS 点的检测	
3.2.1 已有的技术 3.2.2 一种新的自适应 PS 点检测算法 3.2.3 实验结果及分析	39 43 45

3.3 地形相位的去除51
3.4 城市沉降计算55
3.4.1 求解地表沉降的最优化算法55 3.4.2 最优化算法的改进61
3.4.3 实验结果及分析 64
第四章 ERS-ENVISAT 交叉干涉技术71
4.1 概述
4.2 ERS-ENVISAT 干涉的配准与干涉图生成
4.2.1 基于多轨道数据的配准算法及在交叉干涉中的应用74
4.2.2 交叉干涉中的相位偏移现象及去除
4.3 ERS-ENVISAT 中的永久散射体初步研究83
4.3.1 ERS-ENVISAT 交叉干涉在永久散射体研究中的应用 84 4.3.2 基于两组干涉序列的永久散射体连续性研究 87
第五章 结束语
5.1 工作小结
5.2 当前方法的局限性及未来展望
参考文献
附录一:主要符号列表97
附录二:本文使用的数据列表98

第一章 概述

1.1 选题背景与意义

上个世纪末,特别是本世纪初,干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar,简称InSAR)处理技术渐渐地成为了一个热点话题。区别于传统的雷达处理技术只考虑信号的幅度信息,InSAR同时考虑信号的幅度和相位信息。这一新特性决定了它可以更精确地测量地表高度,比如 DEM (Digital Elevation Model)数据的获取,以及地表的形变,比如差分干涉 (Differential InSAR, DInSAR)。

然而,有效的InSAR处理对雷达数据本身有着严格的要求。在大多数实际应用的情况下,我们往往需要获取一大批数据。进一步我们考虑从这些大批的数据中选择相干性"好"的一组图像做干涉。这时我们需要考虑传感器的特性,采集的频率,雷达轨道之间的距离等参数的具体问题。受上述方面的限制,InSAR技术仍然不能得到更广泛的应用。

最近的研究正在努力克服数据方面的种种限制,特别是 A.Ferretti 等人在 2001年提出的永久散射体 (Permanent Scatters, PS) 技术[1]。PS 技术的主要目标 是研究地表的长期变化规律,一个应用就是在城市地区。由于在长时间范围内, 所有的图像不能满足"好"的干涉条件,这一技术的核心思想就是值研究图像 中的一些点 (也就是 PS 点)。我们必须采用先验知识来建立地表的移动模型。 这一技术虽然在一些特例上取得了突出的结果,在系统化的应用上仍然缺少足 够的鲁棒性。

本文研究的主要目标是针对现有 PS 技术存在的一些问题,努力提出新的 解决方案。主要表现在:1)提出了一种新的 PS 点的自适应选择算法,不依赖 于特定的数据集;2)经过分析指出PS中的求解地表形变速度的一般相位模型模 型具有多个解,为了解决这个问题,我们对已有的最优化算法进行了改进,以 期结果的鲁棒性;3)我们的分析指出不同传感器的SAR数据之间(本文中为 ERS (Earth Resources Satellite)和 ENVISAT 的交叉干涉中存在着两个主要的问题: 1)ERS 和 ENVISAT 图像的分辨率有所不同;2)SAR干涉的核心方程中将引入 干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用

新的一项相应于两幅图像不同的分辨率,而这一项需要在获得"规范化"的干涉图之前进行去除。第一个问题给生成干涉图之前的配准带来了复杂性;为了 解决这个问题,我们在已有的配准算法基础上提出了适用于它们之间的配准算法。

1.2 国内外研究概况

在欧空局 (ESA, European Space Agency) 的 ERS-1 卫星发射之前,合成孔 径雷达干涉测量主要利用机载系统。由于机载系统飞行轨道的不确定性,很难 得到较精确的基线参数。1991 年 ERS-1 卫星的发射提供了丰富的 SAR 数据, InSAR 开始成为一个热点的话题。1995 年 ERS-2 卫星的发射,使得 InSAR 逐渐从纯理论跨入使用研究。上个世纪末, InSAR 技术日趋成熟,并且其应用范 围越来越广。

如今, ERS-1 卫星已经结束了它的历史使命。而 ERS-2 卫星, 自从 2001 年 6 月以来开始工作于 ZGM (Zero Gyro Mode), 使得它的不同数据之间多普勒质 心相差很大, 很难满足干涉的要求。作为 ERS 卫星的继承者, ENVISAT 卫星 自从 2002 年发射开始登上了历史的舞台,为 InSAR 的研究提供了新的话题。此 外,目前可以提供 SAR 图像的卫星还有日本的 JERS-1 (Japanese Earth Resources Satellite) 和加拿大的 RADARSAT。

早期的干涉合成孔径雷达主要是利用机载系统。1974 年 Graham[2]利用机载合成孔径雷达数据获取了能够满足 1:25 万地形图要求的高程数据,成为利用 InSAR 技术获取地表三维信息的首例。1986 年, Zebker 和 Goldstein 开始用侧视机载雷达进行实验,在飞机上安装了相距 11.1m 的两个 SAR 天线,获得了分辨率大约 10m 的地形数据[3]。1988 年 Grabriel 和 Goldstein 利用单 L 波段天线航天飞机成像雷达 SIR-B 数据,采用 InSAR 技术研究加拿大不列颠哥伦比亚省北部的洛杉矶山脉地区[4]。同年,Goldstein 等从机载数据转移到星载数据,获取了死亡谷 Cottonball 盆地的数据,采集数据时间间隔为 3 天[5]。Li 和Goldstein 等在 1990 年研究了基线对获取地形数据的影响,误差分析,图像相关建模等[6]。1992 年,Rodriguez 对 Li 等人提出的相干模型进行改进,研究了一般性的散射表面[7]。

美国 JPL 实验室以 Zebker 博士为首的研究小组长期从事干涉 SAR 系统和

数据处理算法等方面的研究,他们研究的课题包括观测地面沉降、高精度 DEM 生成、冰山运动、海浪运动检测等,并且对 InSAR 的去相干因素做了大量的理论和试验分析工作,他们的许多工作为 InSAR 技术的发展奠定了坚实的基础 [12-14]。加拿大有关干涉 SAR 的研究主要集中在加拿大国家遥感中心(CCRS),他们对机载和星载干涉 SAR 系统都做了大量的研究工作[15]。哥伦比亚大学(UBC)由 Cumming 博士领导的干涉 SAR 研究小组研究有关干涉 SAR 的图像处理技术,如 SAR 图像配准、相干性估计、相位展开等,应用方向如冰山移动等。法国位于图卢兹的法国空间研究院 CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)的干涉 SAR 研究小组,由 Massonnet 博士领导,主要研究干涉成像系统、干涉图的影响因素及微分干涉的应用等。他们已有一个处于商业运行中的干涉成像软件系统,名为 DIAPASON,该软件可对 ERS-1/2 的各种格式的数据进行处理,生成干涉条纹图。欧洲还有德国 Stuttgart 的 Hartl 领导的研究小组,意大利 Milan 的 Prati 和 Rocca 等人领导的研究小组。欧空局已经建立了 ERS 研究干涉 SAR 的小组,被称为 ERS-1 FRINGE 小组,每年都组织相关领域的国际研讨会[16]。

随着 InSAR 技术的日益发展与成熟, InSAR 技术已经衍生出多个分支。比较早的有 TInSAR (Tunable InSAR)等[8]。PS 技术的提出,大大丰富了 InSAR 理论的研究。目前,有关 PS 技术在多平台,不同飞行方向的卫星中应用的研究已经展开[9]。ESA 的 ENVISAT 卫星发射后,科学工作们们陆续地对 ENVISAT 数据展开了研究。德国空间中心 (German Aerospace Centre)的研究人员们生成了世界上第一幅 ERS-ENVISAT 的交叉干涉图[10]。此外,PolInSAR (Polarimetric InSAR)技术也已经在各国积极地展开[11],在以后的研究中,多极化是 InSAR 技术发展的主要趋势。

我国对 SAR 成像技术已研究多年。现在许多科研单位和高校正着手干涉合成孔径雷达的研究。中国科学院电子研究所自 1976 年就开始了对合成孔径雷达的研究工作,现在的星载雷达系统部正在进行星载合成孔径雷达系统设计与工程的研制,及星载合成孔径雷达系统地面集成测试与模拟仿真的工作,干涉 SAR 系统研究是电子研究所现代信息技术部正在进行的研究项目。从事干涉 SAR 数据处理和应用研究的科研院所还有中国科学院、工程院院士李德仁教授领导下的武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室、中国林业科学研究院资源信息

研究所遥感应用技术研究室、北京大学遥感与地理信息系统研究所、中国科学 院遥感应用研究所等[17]。

在软件方面,国际上许多研究机构和公司都致力于 InSAR 软件的开发,比 较著名的软件有:加拿大 Atlantis Scientific 公司的 EvInSAR 软件[18];美国空 气动力试验室 JPL 的 Gamma 软件;美国 ERDAS 公司在他们开发的 ERDAS 软件中已经集成了用于 InSAR 处理的 IFSAR 模块[19]。德国的 Delft 大学 B.Kampes 等人开发的著名开放源代码软件 Doris 大大的方便了 InSAR 处理的 研究和应用[20,21],本文相当一部分工作都是在 Doris 的基础上展开的。

1.3 本文主要结构和贡献

本文的主要组织结构与目标如下:

在第二章,我们将介绍一些 InSAR 的主要理论,包括 SAR 图像的配准, 平地效应消除,DInSAR 技术等,并且实现了去除多普勒效应的方位像滤波算法。

在第三章,我们研究了 PS 技术,提出了一种自适应的 PS 点检测算法,对 求解地表变化速度的最优化算法进行了改进。我们改进的 PS 技术应用在北京地 区地表沉降的实际情况,给出了一些的实验结果。

在第四章,我们分析了 ERS 与 ENVISAT 图像交叉干涉的一些基本问题, 包括 ERS 与 ENVISAT 之间的配准,由不同的中心频率产生的相位偏移等。在 这一部分,我们提出了适用于 ERS-ENVISAT 之间的配准方法,并用实验的结 果证明我们的方法大大提高了相干性。

最后一章,对我们的工作进行总结并对未来的工作做以展望。

第二章 SAR 干涉理论与处理技术

本章从介绍 InSAR 的应用出发,介绍了 InSAR 干涉的基本理论,包括 InSAR 的原理、干涉复图像的配准、重采样、平地效应的消除、地理编码、差分干涉技术。在最后一小节中实现了去除多普勒去相关的方位像滤波算法,并且用实验结果验证了相干性的提高。

2.1 InSAR 的应用

InSAR 成像技术在地震监测和震后测量、地面沉降与滑坡监测、火山运动 监测等许多领域有着十分广泛的应用。

震灾害是地壳形变积累的结果,对地壳形变过程的监测和震后测量具有重要的意义。目前,监测地震灾害主要依赖于 GPS (Global Position System)技术、 VLBI 技术、水准测量、应力测量和张力测量等传统方法,但这些方法局限于有选择性地监测一些离散站点。具有高分辩率、连续空间覆盖和高精度等特征的 D-InSAR 技术给与地震有关的形变监测提供了一种极有潜力的新途径。

1997 年, Ponte 率先提交了使用差分雷达干涉技术预测地震的初步研究报告,但结果不太令人满意。Zebker 等认为,差分干涉技术应用于地震预测还有很长的路要走。

然而,研究结果显示使用该技术测量震后位移却具有很好的前景。1993年, Massonnet 等最先基于差分干涉技术使用 ERS-1 SAR 图像序列对 1992年6月28 日发生在美国加利福尼亚州 Landers 的 7.3 级地震震后位移场进行测量,他们使 用地震前 (4月) 和震后 (7月和8月)获取的几对 SAR 影像分别生成干涉图用 以测量地震所造成的位移[25]; 1994年,Zebker 等也发表了利用这一技术对该 地区震后位移进行测量的相似研究报告。他们的研究结果表明:使用 D-InSAR 技术测量震后位移的精度与常规野外精密测量结果的精度相当[26]。随后,一些 学者对上述同一地区使用该技术做了进一步的研究。针对 1993年发生在美国加 利福尼亚州尤里卡—瓦利 (Eureka Valley)地区的 6.1 级地震,类似的研究也有 相继报道。Murakam 也使用 JERS-1 SAR 数据研究了美国加利福尼亚州 Northridge 地震所造成的形变,他认为:L 波段 (JERS-1) SAR 数据比 C 波段 (ERS-1/2, RADARSAT) SAR 数据更能有效地探测震后位移,因为L 波段的雷 达信号比 C 波段信号更能穿透植被,而且对降低时间的失相关更加有利[27]。

地质构造、板块运动和人为因素如城市发展、地下水抽取、固体矿物、石 油及天然气的开采等都会导致地面沉降。许多学者已报道使用 D-InSAR 技术测 量因地下开采而引起的地表沉降的精度可达厘米级或更高。由于地下开采而引 起的地表下沉速度较慢,年平均下沉量一般不超过几厘米,已有的研究表明该 技术用于监测这种大范围(至少几十平方公里)的地表下沉不失为一种有效的方 法。然而,由于地质构造和板块运动引起的地表下沉速度相对缓慢(如几年时间 才可能产生厘米级左右的下沉量),因而从较短时间间隔的 SAR 图像序列探测这 种地表下沉量已超过了 D-InSAR 技术的极限,而使用相隔几年的 SAR 图像对时, 相位相关性将可能相当低甚至完全失相关。

山体滑坡也是极具危险的自然灾害,Achache 等和 Fruneau 等对法国南部 Saint Etienne de Tin 的滑坡现象应用 D-InSAR 技术进行监测,几十个干涉图使 用 ERS-1/2 SAR 图像序列生成并从中提取位移梯度图,利用它们模拟该地区的 变形模型,处理结果与常规离散监测方法吻合程度很高。

火山爆发由地表以下不同层次的岩浆压力及其剧烈运动所造成,它是最严重的自然灾害之一,使用常规方法监测其运动、变化和发展是相当困难的,而干涉技术极其适合其监测。机载 TOPSAR 系统(使用 C 波段, NASA DC-8 飞机) 最先用于对世界上几个火山,如意大利的维苏威火山(Vesuvius)成像,获取的SAR 图像主要用于 DEM 的建立,目的是以此分析火山坡度分布,岩溶厚度和宽度,并提出灾害预防措施。Massonnet 等使用 ERS-1 SAR 数据揭示了意大利 Sicily 的 Etna 火山运动所引起的地表形变信号。1997年,Briole 等也选取埃特纳(Etna) 火山作为研究对象,使用 ERS-1 从 1992年5月到 1993年10月获取的 SAR 图像序列考查了 1986-1987年、1989年多次火山爆发后所造成的地表变形(主要是下沉)。然而应用 D-InSAR 技术动态监测火山运动仍然处于研究之中。

1992-2001 年间, 美国宇航局推进技术实验室研究学者保罗-兰德格林翻 阅了大量 ERS 数据档案,得到了一百多幅埃特纳火山(位于意大利西西里岛的一个活火山)的干涉图。于 1992-2001 年间拍摄的图片组显示,在此时间段,埃特 纳火山的地形最大位移达到 14 厘米。

此外,极地冰川漂移速度和冰川边缘位置变化的监测对研究全球气候的变化具有重要的意义,D-InSAR 已表现出良好的技术优势。随着干涉雷达数据处理

第二章 SAR 干涉理论与处理技术

技术的发展和完善, D-InSAR 技术的应用领域将会继续扩展。

2.2 SAR 干涉基本原理

2.2.1 几何表示

干涉合成孔径雷达是利用目标回波的相位表示在雷达视向上目标与雷达之间的距离,利用两次成像的不同位置关系,依据三角关系可以得到目标的第三维信息——高度或目标的运动情况。对于星载 InSAR 系统,假设两次飞行轨道平行(或近似平行),它的一般几何关系如图 2.1 示。



图 2.1 重复轨道干涉测量几何原理示意图

图中 O_1 、 O_2 表示两个飞行轨道, S1 和S2 分别是两部雷达天线的位置, S1 和S2 之间的距离B称为基线(Baseline), α 为基线B与水平线的夹角, θ 是天线 S1 的下视角(look angle), H为天线S1 距水平面的高度。X轴为平台的飞行方向,也称为方位方向(azimuth direction), y轴为水平面上与飞行方向垂直的方向,称为距离方向(range direction)。

那么目标点 P 到两天线的真实相位差 Φ 与两天线到地面目标 P 的距离 r₁、r₂ 有如下关系:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \tag{2.2.1}$$

根据三角余弦定律,斜距r₁、r₂和基线 B 之间的关系为:

$$r_2^2 = r_1^2 + B^2 - 2r_1 B \cdot \cos(\frac{\pi}{2} - \theta + \alpha)$$
 (2.2.2)

且有:

$$h = H - r_1 \cdot \cos\theta \tag{2.2.3}$$

联立三个方程,可得到目标高度值 h。

2.2.2 矢量表示

现在从 SAR 成像的原理出发,从矢量的角度阐述 InSAR 原理。在以地心为 原点的传统笛卡儿三维参考坐标系下, InSAR 系统的矢量关系如图所示。



图 2.2 InSAR 矢量示意图

图 2.2 中目标点 $\vec{P} = (P_x P_y P_z)^T$, 卫星 S_1 用矢量 $\vec{S}_1 = (S_{1x} S_{1y} S_{1z})^T$ 表示, 卫星 S_2 矢量表示为 $\vec{S}_2 = (S_{2x} S_{2y} S_{2z})^T$, \vec{V}_1 表示卫星 S_1 的速度矢量, \vec{r}_1 表示卫星 S_1 到目标点P的斜距,则有距离方程 (range equation):

$$r_{1} = \left| \vec{P} - \vec{S}_{1} \right| \tag{2.2.4}$$

由 SAR 成像原理,有多普勒方程(Doppler equation)

$$f_d = \frac{\lambda}{2} \frac{\vec{v} \cdot (\vec{P} - \vec{S})}{\left| \vec{P} - \vec{S} \right|}$$
(2.2.5)

且知: $\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{B}$,则有相位方程 (Phase equation)

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\vec{B} \cdot (\vec{P} - \vec{S})}{\left| \vec{P} - \vec{S} \right|}$$
(2.2.6)

用上面的三个方程就可以确定目标点 P.

2.2.3 InSAR 处理流程





虽然 InSAR 的几何原理较为简单,但在实际处理中有很多不确定性的影响, 所以具体实现的算法还是较复杂的。在许多文献中介绍的 InSAR 处理流程也不 尽相同,不过主处理流程还是相似的。以单视复数图像(SLC, Single Look Complex)为例,并且假定我们要生成 DEM 图,基本处理流程如图 2.3。

2.3 干涉处理算法

2.3.1 干涉复图像的配准

干涉复图像的配准在整个干涉处理过程中起着至关重要的作用。所谓配准, 就是给定主图像的某一点,寻找对应于地面上同一点的辅图像中的点。在干涉 处理中,地形对相位的影响非常敏感,如果在配准过程中误差较大,则测量结 果亦导致较大的误差。特别地,当配准误差在一个像元以上时,两幅图像的相 干性几乎将为零,则干涉图为纯噪声,观测不到任何干涉条纹。一般来讲,现 有的干涉图像配准技术精度可达 1/8 像素,能够满足干涉处理的需要[28]。

干涉复图像的配准经历了一个从手工配准,到手工选取控制点的半自动配准,再到基于轨道的全自动配准方法。这里我们简要介绍一下基于轨道的全自动配准方法,前提是假设主辅图像的频率与分辨率相同(ERS-ERS)。对于主、辅图像频率与分辨率不同的情况,比如 ERS-ENVISAT,我们将在以后的章节中讨论。

整个配准过程可以分为三个基本步骤:()基于轨道参数的初始偏移量的估计;()基于相关性的粗配准;()基于相关性的精配准,配准精度可达 1/8 像元。

(-)基于轨道参数的初始偏移量的估计

这一步的基本过程是: 给定主图像上的某一点 $P_m(l,p)$ (一般情况下,可以选取主图像的中心点),利用轨道参数计算该点的地面位置矢量P(X,Y,Z),再根据 辅图像的轨道参数求得辅图像上对应的点 $P_s(l,p)$,则有 $P_c(l,p) = P_m(l,p) + off(l,p)$,那末off(l,p)就是我们要求的初始偏移量。

从以上步骤可以看到,这一步的重点是如何实现图像坐标与地面位置矢量

之间的转换。事实上,在已知精确轨道数据的前提下,我们可以根据以下三个 方程来实现这两个量之间的转换。

1. 多普勒方程: E1: $\overline{X}_{s} \cdot (\overline{X} - \overline{X}_{s}) = 0$ (2.3.1)

2. 斜距方程:
$$E2: (\vec{X} - \vec{X_s}) \cdot (\vec{X} - \vec{X_s}) - (c \cdot t_{range})^2 = 0$$
 (2.3.2)

3. 椭球方程: E3:
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} - 1 = 0$$
 (2.3.3)

以上三式中, \overline{X}_s 表示卫星位置矢量, \overline{X} 表示像元点位置矢量,x,y,z为位置 矢量三个分量,a,b为椭球长,短半轴。

对以上三个方程求偏导,可得:

_

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial E_{1}}{\partial x} & \frac{\partial E_{1}}{\partial y} & \frac{\partial E_{1}}{\partial z} \\ \frac{\partial E_{2}}{\partial x} & \frac{\partial E_{2}}{\partial y} & \frac{\partial E_{2}}{\partial z} \\ \frac{\partial E_{3}}{\partial x} & \frac{\partial E_{3}}{\partial y} & \frac{\partial E_{3}}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{s} & y_{s} & z_{s} \\ 2(x-x_{s}) & 2(y-y_{s}) & 2(z-z_{s}) \\ \frac{2x}{a^{2}} & \frac{2y}{a^{2}} & \frac{2z}{b^{2}} \end{bmatrix}$$
(2.3.4)

上式中 x_s, y_s, z_s 为卫星在X, Y, Z三个方向上的速度分量。卫星的位置矢量 和速度矢量可以通过方位时间,距离时间及 SLC 头文件中的速度矢量和位置矢 量采用差值的方法计算得出。在已知卫星位置和速度矢量的情况下,通过多次 迭代的方法,就可得出像元的位置矢量 \overline{X} 。

这一步的主要步骤可以概括如下:

- 1. 计算主图像上的某点,一般是中心像元, *P_m(l,p)*在椭球体中对应的位置 矢量(*x*,*y*,*z*)
- 2. 根据位置矢量(x, y, z)及多普勒方程,计算辅图像对应的像元坐标 P_s(l, p)
- 3. 根据主,辅图像对应点的像元坐标 $P_m(l,p)$ 及 $P_s(l,p)$,可以求出初始偏移 量 $off(l,p) = P_s(l,p) - P_m(l,p)$

(二)基于相关性的粗配准

相关性是利用主,辅图像的幅度图,以像关系数最大作为配准质量的度量 标准。其中相关系数可以在空间域上进行,也可以在频率域上进行。在这一步 里,首先选择主图像上的一系列点,计算每一个点上的偏移量。对于每一个点, 在主图像上选择匹配窗口,在辅图像上选择搜索窗口。在搜索窗口内计算主, 辅图像不同的相关系数,相关系数最大的点对应的偏移量就可认为是对应主图 像上点的偏移量。这样我们可以得到对应于主图像上一系列点的偏移量。

如何从这些偏移量种选择一个可靠的偏移量是我们要解决的问题。一个很 容易想到的思路就是依据相关性的大小,选择相关性最大的点对应的偏移量。 事实上,这个估算值并不可靠。比如在水体中,偏移量误差较大的情况下仍然 可能得到很高的相关性。所以,我们在估算偏移量的时候,除了考虑相关性最 大的点之外,还要进行"一致性测试"。就是指在计算中得到的偏移量中,保证 多数点的偏移量保持一致,去除其中的明显误差。

除了用幅度图作为配准质量的评价标准外,还可以考虑用复相干系数,同 时考虑到幅度信息和相位信息。这一方法较单纯考虑幅度图更为鲁棒一些,但 必须考虑到平地相位,特别是在基线较大,平地相位影响显著的情况下。除此 之外,目前还有一些其它评价配准质量的准则,比如:(1)频率极大法(以寻求 两幅图像的最大频率为基准);(2)平均波动函数法(以寻求两幅图像相位差后某 点与两个方向相邻点分别相位差的和为最小为基准);(3)最小二乘法(以相位差 的平方和最小为基准)[28]。

通过粗配准这一步,根据轨道参数计算得到的初始偏移量获得了进一步的 修正,为下一步精配准处理奠定了基础。

(三)基于相关性的精配准

类似于粗配准中的相关性估计,这一步也可以在主图像种选择匹配窗口, 在辅图像中选择搜索窗口,并且可以在空间域与频率域中进行。

与粗配准不同的是,在这一步中要选择大量的点来计算偏移量;在估算偏移量的过程中要用到过采样(oversample),以获得更高的配准精度;这一步计

第二章 SAR 干涉理论与处理技术

算的结果不再是某一个偏移量,而是一个坐标变换关系式。一般来讲,这一步 包含以下几个具体步骤:

i. 对主、辅图像进行过采样处理

ii. 对主图像上的每一个点,在搜索窗中进行最大相干估计

iii. 选择相关性大于某一阈值的点作为控制点,进行数据拟合,得出主,辅 图像坐标间的变换关系式,以便进一步的过采样处理。

在实际处理过程中,也有人把 i, ii 两个步骤颠倒过来。也就是说,首先对 主图像上的某一点在搜索窗内计算相关系数矩阵,然后对实相关系数矩阵进行 过采样处理。这样虽然可能增大了误差,但大大减少了工作量,在误差允许的 条件下,这不失为一种策略。著名的开放代码的软件 Doris,就是用这种策略来 实现复图像的精确配准[20,21]。

一般来讲,通过精配准这一步可使匹配精度达 1/8 像素,满足雷达干涉处理的需要。

对于主、辅图像有细微的分辨率差别的情况,比如 ERS-ENVISAT,上述配 准过程存在较大的误差,特别是对于整景图像,偏移量在不同的像素点可能差 别很大。本文将在以后的章节中专门讨论这一问题。

2.3.2 干涉复图像重采样与干涉图的生成

在对主、辅图像进行精配准以后,可以得到主、辅图像间的坐标变换关系。 下一步就是对辅图像进行重采样,把辅图像的坐标投影到主图像的坐标中去, 使投影后的辅图像上的某一点严格对应主图像上的点。在重采样的过程中,差 值算法直接决定了重采样的精度和运算速度。而差值算法的关键在于差值核的 选择,因此适当选取合适的插值核有利于提高差值精度和运算速度。一般来讲, 最优差值核的选择取决于信号的相干特性。目前较为常用的插值核有:

● 最近邻插值:

.

$$i(x) = rect(x) = \begin{cases} 0(|x| > \frac{1}{2}) \\ \frac{1}{2}(|x| = \frac{1}{2}) \\ 1(|x| < \frac{1}{2}) \end{cases}$$
(2.3.5)

● 分段线性插值:

$$i(x) = tri(x) = \begin{cases} 0(|x| > 1) \\ 1 - |x|(|x| < 1) \end{cases}$$
(2.3.6)

$$i(x) = \begin{cases} (\alpha + 2) |x|^{3} - (\alpha + 3) |x|^{2} + 1(0 \le |x| < 1) \\ \alpha |x|^{3} - 5\alpha |x|^{2} + 8\alpha |x| - 4\alpha(1 \le |x| < 2) \\ 0(2 \le |x|) \end{cases}$$
(2.3.7)

• 六点立方卷积
$$(\alpha = -\frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{2})$$
:

$$i(x) = \begin{cases} (\alpha + \beta + 2) |x|^{3} - (\alpha + \beta + 3) |x|^{2} + 1(0 \le |x| < 1) \\ \alpha |x|^{3} - (5\alpha - \beta) |x|^{2} + (8\alpha - 3\beta) |x| - (4\alpha - 2\beta)(1 \le |x| < 2) \\ \beta |x|^{3} - 8\beta |x|^{2} + 21\beta |x| - 18\beta(2 \le |x| < 3) \\ 0(3 \le |x|) \end{cases}$$
(2.3.8)

对于雷达信号干涉处理,选择四点立方卷积一般可满足插值精度的要求。 若要获得更高的精度,也可选择六点立方卷积。

在对辅图像进行重采样之后,即可生成复干涉图像。

事实上,假设主图像上一点为M(x, y),辅图像上一点为S(x, y)我们有:

$$M(x, y) = A_1(x, y)e^{j\phi_1(x, y)}$$
(2.3.9)

$$S(x, y) = A_2(x, y)e^{j\phi_2(x, y)}$$
(2.3.10)

则干涉复图像可以表示为:	
$I(x, y) = M(x, y) \cdot S^*(x, y) = A_1(x, y)A_2(x, y)e^{j(\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y))}$	(2.3.11)
其中:	
$A(x, y) = A_1(x, y)A_2(x, y)$	(2.3.12)
$\phi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)$	(2.3.13)

我们称(2.3.12)为干涉幅度图, (2.3.13)为干涉图。

在实际处理过程中要比上述复杂一些,还要考虑到多视处理(multi-look)等情况。必须注意的是,此时生成的干涉图包括了由于平地效应而引起的附加相位,因此必须进行去平处理,去掉由平地效应而引起的相位。

2.3.3 平地效应的消除

所谓水平地形效应是指水平地面上高度相同的两物体由于距离卫星的距离 不同所产生的相位差异。造成这种现象的根本原因在于,合成孔径雷达采用的 是斜距成像的方式,即它是根据接受回波信号的先后顺序成像的,先接收的信 号先被记录。平地效应会使得干涉图条纹过密,造成相位解缠的困难,所以必 须在解缠前,去掉水平地形效应。

在不考虑噪声和大气附加相位等的影响下,干涉相位可以分成平地相位和 高度相位两部分。事实上,在国内外的很多文献中,我们都可以看到干涉相位 可以表示为如下的形式:

$$\phi(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_n \frac{h(x, y)}{\sin \theta} + \frac{4\pi}{\lambda R} B_n \frac{\eta(x, y)}{\tan \theta}$$
(2.3.14)

上式中*h*(*x*, *y*)表示该点的高度, η(*x*, *y*)表示该点的斜距位置。(2.3.14)右边 的两项还可表示为:

$\phi_h(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_n \frac{h(x, y)}{\sin \theta}$	(2.3.15)
$\lambda \Lambda$ $\sin \theta$	

$$\phi_{\eta}(x,y) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_n \frac{\eta(x,y)}{\tan \theta}$$
(2.3.16)

式(2.3.15)称为高度相位, (2.3.16)称为平地相位。

分析(2.3.14)-(2.3.16),我们可以得到如下结论:①对于高度相同,斜距位置 不同的两点,它们的平地相位不同而导致最终干涉相位的不同;②对于斜距位 置相同的两点,在入射角差别可以忽略的情况下,产生的平地相位一定相同。 我们完全可以根据结论②,制定一个基于轨道参数的平地效应计算方法。

到目前为止,主要的平地效应计算方法有:()基于轨道参数的平地效应计算;()根据图像能量计算平地效应;()通过测量距离向和方位向的占优势的干涉条纹频率来计算平地相位。本文仅对第一种方法作简要介绍。



图 2.4:基于轨道参数的平地效应

如图 2.4 所示, O是椭球中心, S_1, S_2 是主、辅图像对应传感器。假设 P 是 干涉图像上一点, 它到传感器 S_1 的距离是 R, 为了求出 P 点对应的平地相位 $\phi_{P\eta}$, 我们考虑椭球面上一点 P', 它到传感器 S_1 的距离也是 R。由于点 P'在椭球面上, 故它的高度 $h_{p'} = 0$,因此我们有:

$$\phi_{P'h} = 0 \tag{2.3.17}$$

进一步有:

$$\phi_{P'} = \phi_{P'\eta} + \phi_{P'h} = \phi_{P'\eta} \tag{2.3.18}$$

另一方面,由于点 *P* 与点 *P*′ 到 *S*₁ 的距离相等,根据式(2.3.16)及(2.3.18)我们可知:

$$\phi_{Pn} = \phi_{P'n} = \phi_{P'} \tag{2.3.19}$$

至此我们可以看到,只要求出 P' 点的相位,就能够得到 P 点的平地相位。 在有的文献中, P' 点的相位也叫做参考相位。

实际上,如果 P'点到 S_1 与 S_2 的距离分别是 $R = R + \Delta R$ 根据雷达干涉的理论,我们很容易得出 P'点的干涉相位:

$$\phi_{P'} = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R \tag{2.3.20}$$

在已知轨道参数的情况下,我们就可以根据 2.3.1 节中的方程(2.3.1)-(2.3.3),我们就可以得出距离 $R = R + \Delta R$,从而求出 P'点的参考相位,也就是P点的平地相位。

2.3.4 地理编码

所谓地理编码,就是指点在不同坐标参考系下的坐标转换。遥感图像中经 常用到的坐标系有:

(1)地心坐标系(X,Y,Z): 以地球椭球中心为原点的空间直角坐标系

(2)大地坐标系(L,B,H): 三个分量分别表示该点的经度,纬度和高度

(3)高斯坐标系(x,y):点在高斯投影面上的直角坐标。

SAR 图像处理中一般直接得到的是地心坐标(*X*,*Y*,*Z*),为了符合实际的要求,经常需要转化成地面高斯坐标(*x*,*y*),这一工作需要分成两步来完成: (→由地心坐标转化成大地坐标; (→由大地坐标转化成高斯坐标

(一)由地心坐标转化成大地坐标

在已知地球长、短半轴及偏心率的情况下,容易实现从地心坐标(*X*,*Y*,*Z*)到 大地坐标(*L*,*B*,*H*)之间的转换:

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2}$$
(2.3.21)

$$\alpha = \arctan\frac{Z \cdot a}{r \cdot b} \tag{2.3.22}$$

$$L = \arctan\frac{Y}{X}$$
(2.3.23)

$$B = \arctan \frac{Z + e^{\prime 2} b \sin^3 \alpha}{r - e^2 a \cos^3 \alpha}$$
(2.3.24)

$$H = \frac{r}{\cos B} - \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$$
(2.3.25)

已知地心空间坐标(*X*,*Y*,*Z*),即可根据式(2.3.21)-(2.3.25),求得相应的大地 坐标(*L*,*B*,*H*)。

(二)由大地坐标转化成高斯坐标

这一步转换比较复杂,对于不同区域的投影,需要选择不同的中心经度和 纬度,而对于不同的投影系统,具体参数也有所不同。一般情况下,给定某区 域的中心经度L₀和纬度B₀,投影后的高斯坐标(x,y)可表示为:

$$x = (L - L_0)N\cos B + \frac{1}{6}(L - L_0)^3 N\cos^3 B(1 - \tan^2 B + \eta^2)$$

$$+ \frac{1}{120}(L - L_0)^5 N\cos^5 B(5 - 18\tan^2 B + \tan^4 B + 14\eta^2 - 58\tan^2 B\eta^2)$$
(2.3.26)

$$y = Y + \frac{1}{2}(L - L_0)^2 N \cos^2 B \tan B$$

+ $\frac{1}{24}(L - L_0)^4 N \cos^4 B \tan B(5 - \tan^2 B + 9\eta^2 + 4\eta^4)$
+ $\frac{1}{720}(L - L_0)^6 N \cos^6 B \tan B(61 - 58 \tan^2 B + \tan^4 B)$ (2.3.27)

其中:

$$Y = N \frac{B}{1+\eta^2} + \left(\frac{B}{1+\eta^2}\right)^2 \frac{3}{2} N \eta^2 \tan B$$

- $\left(\frac{B}{1+\eta^2}\right)^3 N \frac{\eta^2}{2} (\tan^2 B - 1 - \eta^2 - 4\eta^2 \tan^2 B)$ (2.3.28)

$$\eta^2 = \frac{N}{\rho} - 1 \tag{2.3.29}$$

N,*ρ* 分别为*X*,*Y*方向上的投影参数。

特别地,取:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \tag{2.3.30}$$

$$\rho = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\phi)^{\frac{3}{2}}}$$
(2.3.31)

这就是著名的墨卡托(mercator)投影。

2.3.5 差分干涉处理技术

差分干涉技术是指利用同一地区的两幅干涉图像,其中一幅是通过形变前的两幅 SAR 获取的干涉图像,另一幅是通过形变前后两幅 SAR 图像获取的干涉 图像,然后通过两幅干涉图差分处理(除去地球曲面、地形起伏影响)来获取 地表微量形变的测量技术。该技术主要用来监测地表的微量形变,例如监测地

壳形变和大陆漂移,监测喜马拉雅山顶高程的变化等。

差分干涉主要分为双轨法和三轨法两种。本文首先以三轨法为例,介绍差 分干涉的基本原理。



图 2.5: 差分干涉示意图

如图所示, *S*₁,*S*₂,*S*₃是卫星成像时的位置,其中*S*₂获取与发生于地表形变之后, *S*₁,*S*₃获取于发生形变之前。对于地表面上一点*P*,由*S*₁所产生的复信号为:

$$S_1(P) = A_1(P) \exp(-\frac{4\pi}{\lambda}R_1)$$
 (2.3.32)

由于S,获取于P点发生形变之后,因此S,所产生的复信号为:

$$S_2(P) = A_2(P)\exp(-\frac{4\pi}{\lambda}R_2 + \delta r)$$
(2.3.33)

S₃仍为发生形变之前,因此S₃所产生的信号为:

$$S_3(P) = A_3(P) \exp(-\frac{4\pi}{\lambda}R_3)$$
 (2.3.34)

对于S₁与S₂,我们可以根据雷达干涉的基本理论生成一幅干涉图:

第二章 SAR 干涉理论与处理技术

$$\phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_2 + \delta r - R_1) \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B\sin(\theta_1 - \alpha_1) - \frac{4\pi}{\lambda}\delta r = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel} - \frac{4\pi}{\lambda}\delta r \quad (2.3.35)$$

注意到式(2.3.35)中包含由形变δr引起的附加相位。

同样地,对于*S*₁与*S*₃,并且注意到他们均获取于发生形变之前,因此生成的干涉图为:

$$\phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_3 - R_1) \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B' \sin(\theta_2 - \alpha_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} B'_{\parallel}$$
(2.3.36)

式(2.3.35)与(2.3.36)中 B₁与 B'₁均可由轨道参数算得。结合上述两式,我们可 以得到由视像方向的形变量 δr 所引起的相位为:

$$\phi_d = \phi_1 - \frac{B_{\parallel}}{B_{\parallel}'} \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta r$$
(2.3.37)

在已知 B_{\parallel} 与 B'_{\parallel} 及两幅干涉相位图的情况下,我们就可以根据式(2.3.37)计算 出点P的形变量 δr 。

在实际应用中,我们经常用去平地后的干涉图来生成差分干涉图,从而求 得形变量。这样做的好处是计算渐变而且精度高。事实上,去平地后的相位可 以表示为:

$$\phi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} [B\sin(\theta - \alpha) - B\sin(\theta_0 - \alpha)] = -\frac{4\pi}{\lambda} B_n \Delta \theta \qquad (2.3.38)$$

对于S₁与S₂生成的干涉图,考虑到形变,去平地后的相位可以表示为:

$$\phi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_n \Delta \theta - \frac{4\pi}{\lambda} \delta r \qquad (2.3.39)$$

对于S₁与S₃,去平后的相位则为:

$$\phi'_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B'_n \Delta\theta \tag{2.3.40}$$

那么此时的差分干涉相位可以表示为:

$$\phi_{d} = \phi_{flat} - \frac{B_{n}}{B_{n}'} \phi_{flat}' = -\frac{4\pi}{\lambda} \delta r$$
(2.3.41)

根据式(2.3.41),我们可以得出差分干涉对地表形变的敏感度:

$$\frac{\phi_d}{\delta r} = -\frac{4\pi}{\lambda} \tag{2.3.42}$$

对于 ERS-1&2 SAR 系统, $\lambda \approx 5.6 cm$, 由式(2.3.42)可见, 在 $\delta r \approx 2.8 cm$ 时就可以产生一个 2π 的相位变化, 由此可见差分干涉相位对地形变化相当敏感。

以上是三轨法差分干涉的原理,所谓三轨法就是用三幅 SAR 图像,包括两复形 变前和一幅形变后的图像,来进行差分干涉进而获得地表形变信息。该方法的 缺点是:当 SAR 数据的相干性较差时,生成的干涉图质量即干涉条纹的清晰度 较差,相位信息的可信度降低,造成了相位解缠的困难,并且如何判断形变发 生时间,多幅同一区域 SAR 图像的获取都会为 DInSAR 技术带来一定的困难,



该过程的流程图可表示为:

图 2.6 三轨法差分干涉测量流程图

在三轨法的基础上, Massonnet 等人提出了双轨法差分干涉测量原理,为了 去掉干涉图相位信息中所蕴涵的地形相位信息,而仅仅保留形变引起的相位信 息,他采用了干涉图与已知 DEM 相结合的方法,通过 DEM 来模拟地形干涉图, 然后去掉这部分信息,得到形变信息,以此来避免相位解缠算法中存在的问题。 该过程的流程图可表示为图 2.7:



图 2.7: 双轨法差分干涉处理流程

近年来, 我国学者张景发等人提出了四次过境算法(四轨法)[29], 用四幅 SAR 图像来生成差分干涉图,这一技术在一定程度上进一步提高了差分干涉的 处理精度。由于篇幅所限,本文对这一算法不再做介绍。

2.4 干涉 SAR 图像方位向滤波及实现

2.4.1 频谱偏移现象及原理

在通常的 SAR 干涉处理过程中,对于 ERS-ERS 的情况,我们认为主、幅图 像的频率完全相同。并且由于雷达信号的频带宽度与主频率相比非常小,可以 忽略不计,我们认为 SAR 图像的频率是某一固定值 *f* 。基于这一考虑, SAR 干 涉的基本原理可以表示为:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \tag{2.4.1}$$

对于实际情况,由于基线的存在使得主、辅图像回波信号的入射角存在差 异,最终将导致接收信号的频率产生差异。在这种情况下,必须从普分析的角 度来研究这个问题,雷达信号的频带宽度不能忽略不计。理论上说,基线越大, 频谱偏移越大,主、辅图像频谱重叠的部分越小。在基线大于某一临界值的时 候,主、辅图像间没有重叠的频带,因此相干性几乎为零,无法生干涉图。Fabio.G 等人在他们的论文中,详细分析了频谱偏移和基线之间的关系[30]。



图 2.8:InSAR 几何关系示意图

如图 2.8 所示, *α* 为地形坡度角,则斜距方向的波数在坡度角为*α* 的地距方 向上的投影为:

$$k_{y} = \frac{4\pi}{\lambda}\sin(\theta - \alpha) = \frac{4\pi f}{c}\sin(\theta - \alpha)$$
(2.4.2)

第二章 SAR 干涉理论与处理技术

考虑地形坡度角 α 不变,在入射角 θ 发生微小的变化 $\Delta\theta$ 时,也就是(2.4.2) 式对 θ 微分,得:

$$\Delta k_{y} = \frac{4\pi f}{c} \cos(\theta - \alpha) \Delta \theta \qquad (2.4.3)$$

对于一般的雷达信号,频带宽度与中心频率相比远远可忽略不计,则式(2.4.3) 中的频率 f 可用雷达信号的中心频率 f₀来代替,从而式(2.4.3)又可以写成:

$$\Delta k_{y} = \frac{4\pi f_{0}}{c} \cos(\theta - \alpha) \Delta \theta \qquad (2.4.4)$$

另一方面,式(2.4.2)中f可以看成是波数 k_y 的函数,在(2.4.2)中f对 k_y 求微分,可得:

$$\Delta f = \frac{c}{4\pi} \frac{\Delta k_y}{\sin(\theta - \alpha)} \tag{2.4.5}$$

结合(2.4.4)与(2.4.5)我们最后可以得到

$$\Delta f = -\frac{f_0 \Delta \theta}{\tan(\theta - \alpha)} = -\frac{cB_n}{R\lambda \tan(\theta - \alpha)}$$
(2.4.6)

式(2.4.6)最终给出了频谱偏移与基线及地形坡度角之间的关系,从(2.4.6)式 我们可以得出如下结论:

i. 基线决定着两幅 SAR 图像整体上相干性的大小。基线越大,主、辅图像
 间的频谱偏移越大,它们频谱间的重叠区域就越小,从而相干性就越小。特别
 地,当基线大于某一临界值时,两幅图像频谱没有重叠区域,则没有相干性,
 无法生成干涉图。假设雷达信号的频带宽度为W,则临界基线可以表示为:

$$\left|B_{nc}\right| = \left|\frac{WR\lambda\tan(\theta - \alpha)}{c}\right|$$
(2.4.7)

对于 ERS 数据, $|B_{nc}| \approx 1100m$, 也就是说, 在基线大于这一数值时, 两幅图 像几乎没有相干性, 无法生成干涉图。

ii. 频谱偏移的大小与像素点所在的地形坡度角密切相关。从(2.4.6)我们可以 看到,地形坡度角 α 越接近入射角 θ 时,频谱偏移就越大,特别地,当 $\alpha \rightarrow \theta$ 时, $\Delta f \rightarrow \infty$,两幅图像在该点的相干性就为零。另一方面,当 $\alpha < \theta$ 时,频谱偏移 Δf 为负,其大小随着 α 的增大而增大,而当 $\alpha > \theta$ 时,频谱偏移为正,并且其大小 随着α的增大而减小。在国外也有人利用频谱偏移来研究地形坡度角的大小 [30]。

由基线引起的去相关也叫做几何去相关,它存在于雷达图像的方位向。解 决这一去相关的方法是滤波。在实际算法实现中,由于地形坡度角未知,因而 很少用式(2.4.6)来计算频谱偏移,而是采用自适应的方法估算出重叠部分的频 谱,滤掉频谱的非重叠部分。在下一小节中我们将看到,多普勒效应的存在会 导致方位向的频谱偏移,本文实现了解决多普勒去相关的方位向滤波算法,将 在后面的小节中详细介绍。

在本节中我们看到,基线的增大使得两幅图像的相干性变小。而从干涉雷达的处理精度的角度来考虑,基线越大,处理精度则越高。根据雷达干涉的基本理论,由单位高度引起的相位变化可以表示为:

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta h} = \frac{4\pi B_n}{\lambda R \sin\theta}$$
(2.4.8)

由式(2.4.8)可知,基线越大,则由单位高度差引起的相位差越大,说明干涉 相位对高度约敏感,处理精度越高。因此从这一角度来讲,我们希望尽量增大 基线。为了解决这一矛盾,有人提出了 TInSAR 理论,根据基线的大小来调节主、 辅图像雷达信号的频率。在以后的章节中我们将看到,ERS-ENVISAT 的交叉干 涉正是利用基线来补偿主、辅图像的频率差,使得生成大基线的干涉图成为可 能。关于 ERS-ENVISAT 交叉干涉的理论我们将在第四章中详细介绍。

2.4.2 由多普勒效应带来的方位向频移

多普勒效应是由奥地利物理学家多普勒发现并提出的一类物理现象。这一 现象的原因是由于波源与观察存在相位运动,而导致观察者实际接收到的波的 频率与波源的频率有所不同。在雷达成像过程中,卫星在天上飞行,则有可能 产生相对于反射体的斜距向速度,由此导致多普勒频移。


图 2.9: 雷达信号中的多普勒效应示意图

如图 2.9 所示, *S*表示卫星, *P*表示地面反射体。假定卫星飞行时存在一个 相对于地面反射体*P*的斜距向速度*v*,则*S*发出的电磁波信号,相对于*P*的传播 速度为*c*+*v*。那么*P*接收信号的频率就是:

$$f_r = \frac{c+v}{\lambda} \tag{2.4.9}$$

另一方面,卫星发射信号的频率是:

$$f = \frac{c}{\lambda} \tag{2.4.10}$$

比较式(2.4.9)与(2.4.10)可以看到,反射体接收信号的频率与雷达发射信号的 频率有所不同。在实际 SAR 图像成像过程中,发射信号的中心频率为 f₀,频带 宽度为W,则接收信号的中心频率相对于发射信号会有一定的偏移,偏移的大 小称为多普勒频率质心。

与几何去相干类似,由多普勒效应引起的频移也会带来去相干。上一节中 我们提到,处理几何去相关的办法是滤波,对于多普勒去相干也可以采取类似 的办法,对主、辅图像进行滤波处理,滤掉主、辅图像频谱的非重叠部分,保 留它们的共同部分。

几何去相干作用于干涉图像对的距离向,那么多普勒去相干作用于方位向。

在 ERS, ENVISAT 等数据的头文件中均给出了计算多普勒质心的多项式各次系数, 根据这些系数可以求得每一行的多普勒质心。在下一小节中我们将给出一个实现方位向滤波的具体算法。

2.4.3 方位向滤波的算法及实现

前面两个小节中指出了多普勒质心的存在导致了主、辅图向方位向上的频 谱偏移,由此引起方位向上的多普勒去相关,而解决这一问题的途径是滤波。 方位向滤波需要对主、辅图像同时进行,在进行滤波前,首先要估计出一个辅 图像对主图像的偏移量,因此这一步一般在粗配准与精配准之间进行。

方位向滤波的主要思路是:首先对主、辅图像进行方位向一维傅立叶变换, 变换到频率域;由于多普勒效应的存在使得主辅图像中心频率不同,两幅图像 的频谱处在不同的范围内,但是仍然有相当一部分重叠在一起,我们选择适当 的滤波器函数,保留频谱重叠的部分,滤掉其它部分。

如图 2.10 所示, B_w 表示方位向带宽, 对于 ERS2 数据, B_w =1378 H_z 。 f_1, f_2 分别是主、辅图像考虑多普勒效应后的中心频率。阴影部分表示需要滤掉的部分, 阴影部分中间则是两幅图像频率域共同的部分, 也就是需要保留的部分。 B_{new} 表示滤波后新的方位向带宽, 则由图中易知:

$$B_{new} = B_w - |f_1 - f_2| = B_w - |f_{DC} - f_{DC}'|$$
(2.4.11)

其中 f_{pc}, f'_{pc} 分别表示主、幅图像的方位向多普勒质心。



图 2.10: 方位向滤波示意图

在式(2.4.11)中,如果有|*f*_{DC1} − *f*_{DC2}|≥*B*_w,对应于图 2.10,两幅图向方位向频谱没有重叠部分,两幅图像毫不相干,无法生成干涉图。由此可见,两幅图像的多普勒质心对生成的干涉图的质量至关重要。

下面一个问题是如何求得两幅图像的多普勒质心。事实上,方位向的多普勒质心可以表示为行数的二次多项式。多项式的系数一般可以在 SAR 图像数据中查到。对于 ERS 数据,完全可以从头文件中查得二次多项式的各次系数 *f*_{DC0},*f*_{DC1},*f*_{DC2}。有了这些数据,方位向的多普勒质心可以表示为:

$$f_{DC}(i) = f_{DC0} + f_{DC1} (i/RSR) + f_{DC2} (i/RSR)^2$$
(2.4.12)

上式中i表示所在的列数, RSR 表示距离采样频率。

对于辅图像,假设通过粗配准后获得的偏移量为*initoff*,对应的多项式系数 分别为 $f'_{DC0}, f'_{DC1}, f'_{DC2}$,类似于(2.4.12),辅图像的对应多普勒质心可表示为:

 $f'_{DC}(i + initoff) = f'_{DC0} + f'_{DC1} (\frac{(i + initoff)}{RSR}) + f'_{DC2} (\frac{(i + initoff)}{RSR})^2 (2.4.13)$

最后一个问题是滤波器的选择,比较流行的滤波器有:

i. 矩形滤波器:

$$f(u) = \begin{cases} 1(|u| < \frac{B_{new}}{2}) \\ 0(other) \end{cases}$$
(2.4.14)

ii. Hamming 滤波器:

$$f(u) = \begin{cases} \alpha + (1 - \alpha) \cos \frac{2\pi u}{B_{new}} (|u| < \frac{B_{new}}{2}) \\ 0(other) \end{cases}$$
(2.4.15)

上式中α ∈ (0,1), 在这里可以取α =0.75[31]。

方位向滤波的具体步骤可以概括如下:

(1) 对主图像的每一列进行一维 FFT 变换,同时根据行偏移量,对幅图像的 相应行也进行一维 FFT 变换。

(2) 根据行数,偏移量,以及主辅图像相应的多普勒系数,由(2.4.12)及(2.4.13) 估算主、辅图像对应的多普勒质心。

(3) 根据式(2.4.11)计算出新的方位向频带宽度。

(4) 选择适当的滤波器,在频域分别对主,幅图像进行滤波处理。

(5) 最后对主、幅图像的相应列进行一维 IFFT 变换,将其反变换回空间域中。

方位向滤波一般在粗配准与精配准之间进行。但是这一步并不是必需的, 因为考虑到粗配准的精度,这一步虽然能够有效的提高相干性,然而同时也有 可能引入新的误差。

2.4.4 实验结果及分析

我们的实验选择了北京地区的两幅 ERS 图像,其中主图像获取于 1998 年 9 月 2 日,为 ERS2 图像,辅图像获取于 1997 年 10 月 21 日,为 ERS1 图像。截

第二章 SAR 干涉理论与处理技术

取图像大小为 5000×1000,覆盖了北京地区的主要城区。通过 ERS 头文件,查得两幅图像的多普勒系数如下:

图像获取时间	1998/09/02	1997/10/21
常数项(Hz)	190.8110	414.0900
一次项(Hz/sec)	517149.0000	640231.0000
二次项(Hz/sec ²)	-1945000000.0000	-2666000000.0000

表 2.1: 两幅实验数据多普勒系数对照表

从表 2.1 中我们可以看到,两幅图像的多普勒质心存在偏差。偏差大小为 Δ*f* ≈ |*f*_{DC1} − *f*'_{DC1}|=223.279(*Hz*),约为方位向带宽的 1/6,因而存在多普勒去相关 现象,可以用滤波的方法降低多普勒去相关,提高干涉图的质量。



图 2.11: 两幅图像干涉后的幅度图

对两幅图像进行粗配准处理后,获得相对偏移量为:(123,-55)。根据相对 偏移量及两幅图截取的位置,以及多普勒系数等对主、幅图像同时进行滤波处 理,并且分别生成了未经滤波和滤波后的干涉图和相干图。经过多视处理后, 干涉图和相干图的大小约为 500×500。图 2.11 为干涉幅度图,从干涉幅度图可 以看到我们所选地区的概貌。 干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用



图 2.12 显示了滤波前后的相干图及对应的直方图。









图 2.12b: 滤波前相干图直方图



图 2.12d: 滤波后相干图直方图

图 2.12: 滤波前后相干图及相应直方图

分析图 2.12 我们可以看到,虽然从相干图本身我们难以观察到明显的变化, 但是从直方图上看,图 2.12.d 与图 2.12.b 相比整体上明显有一个向右的偏移。 也就是说,相干性在总体上来说是提高了。滤波前最大相干值在 0.82 左右,经 过滤波,最大相干值提高到了 0.88 左右。因此从相干图的角度来分析,方位向 的滤波提高了图像的相干性。

图 2.13 比较了滤波前后的干涉图。从干涉图上我们可以看到,滤波后的噪声少了一些,干涉图的质量有所提高,但仍然存在很多的噪声。事实上,引起 去相干的因素出了多普勒去相干外,还包括以下几个方面:

- 几何去相关
- 大气去相关
- 热噪声去相关
- 时间去相关
- 数据处理去相干



图 2.13a: 滤波前干涉图



图 2.13: 滤波前后干涉图的比较

在上述几个去相干因素中,几何去相干就是由基线引起的去相干,解决这一问题的方法是对距离项进行滤波。热噪声去相关可以对 SAR 图像数据进行预处理,比如采用小波分析的方法。数据处理去相干则可以通过尽可能提高数据处理的精度,如提高精配准的精度、采用好的插值核等方法减少。而减小时间去相干和大气导致的去相干更为复杂,可以结合 GPS(Global Position System,全球定位系统)等。因此,若要进一步提高相干性,从而改善干涉图的质量,必须考虑到以上几个去相干的因素。

第三章 永久散射体技术

本章首先分析了 PS 技术的理论及主要处理过程。在 PS 点的选择方面,本 文在第二节提出了一种新的自适应算法。第三节给出了 PS 处理中去除地形相位 的具体方法。在第四节求解地表形变的过程中,本文改进了以有的最优化算法, 以获得更好的收敛结果。作为应用,本文将 PS 技术用于北京地区的地表沉降现 象处理中,并且给出了实验结果

3.1 基本理论

永久散射体(Permanent Scatters, PS)技术是由 A.Ferretti 等人在 2001 年提出的 一项 InSAR 领域的新技术[1]。所谓永久散射体,就是一些在相当长的时间内仍 然能保持稳定的反射特性的散射体。永久散射体技术源于 DInSAR 技术,它的 主要目标是研究某一地区地表的长期变化规律。虽然 DInSAR 技术可以精确地 测量地表形变,但是在时间间隔较长的情况下,许多地表反射体的反射特性可 能发生了很大的变化。此时,严重的时间去相干几乎导致了干涉的无法进行, DInSAR 技术则表现出无能为力。永久散射体技术则可以很好地解决这一问题, 它的基本原理就是:在给定的一组雷达干涉图像中,按照某种准则选择相位稳 定的一系列点作为永久散射体,并且根据给定的相位模型,研究在这些散射体 上的大气附加相位,地表升降变化等。在永久散射体处理过程中,一般要用到 大批的数据,通常为 30 幅数据以上,这样,一方面能够保证选取 PS 点的可靠性, 另一方面也能保证算法的收敛性和结果的准确性。

与传统的 InSAR 及 DInSAR 等处理技术相比, PS 技术有着其独特的优势。 第一,在图像的选择中,可以选择具有大的时间基线和距离基线的图像对,距 离基线甚至可以超过理论上的临近值,从 InSAR 的理论角度上讲,这将有助于 提高处理的精度。第二, PS 处理的精度非常之高,可以达到 mm 的数量级,从 而可以应用于测量城市的沉降变化等。另一方面, PS 技术也有其自身的局限性: 考虑到大气相位模型的有效性,一般 PS 处理只局限于较小的区域;在地表斜距 视线向(Line of Sight,LOS)变化规律不确定的情况下,地表变化很难用一个变化 模型来描述,特别是线性模型有相当大的局限性。

本节介绍 PS 处理的一些基本理论,包括系统模型的建立,以及处理的主要步骤等。在以后的几节中将详细介绍 PS 的主要处理过程,并且给出了一些应用于北京地区的实验结果。

3.1.1 相位模型的建立

根据 InSAR 处理的基本理论, SAR 干涉图的相位可以认为由以下几个部分 构成[36]:

i. 由几何关系引起的相位 $\phi_r(x)$;

ii. 由地表形变引起的相位 $\phi_{\mu}(x)$;

iii. 大气相位(Atmospheric Phase Screen, APS) $\phi_a(x)$;

iv. 相位噪声 $\phi_{\sigma}(x)$ 。

x = (ξ,η) 来表示 SAR 图像中的像素, ξ,η分别表示像素的方位向和距离向 位置,使用数学表达式,干涉相位可表示为:

$$\phi(x) = \phi_r(x) + \phi_\mu(x) + \phi_a(x) + \phi_\sigma(x)$$
(3.1.1)

其中 $\phi_r(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r(x)$, $\phi_{\mu}(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \mu(x)$ 。根据 SAR 干涉的基本理论, 几何

相位 $\phi_r(x)$ 还可以分成由高度引起的相位 $\phi_q(x)$ 和由斜距位置引起的相位 $\phi_\eta(x)$ 两部分。也就是说,干涉相位可以进一步表示为:

$$\phi(x) = \phi_q(x) + \phi_\eta(x) + \phi_\mu(x) + \phi_a(x) + \phi_\sigma(x)$$
(3.1.2)

在上一章中,我们已经提到这两部分可以表示为:

$$\phi_q(x) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_n \frac{q(x)}{\sin \theta}$$
(3.1.3)

$$\phi_{\eta}(x) = \frac{4\pi}{\lambda R} B_n \frac{\eta(x)}{\tan \theta}$$
(3.1.4)

(3.1.3)又可以称作平地相位,它可以根据基线长度,斜距距离,距离向位置

等估算出来,对于(3.1.4)的估算需要预先知道地表的高度 q。

(3.1.2)就是我们所要用到的基本相位模型,其中 $\phi_\eta(x)$ 可以在干涉图生成的 过程中去处,而 $\phi_q(x)$ 可以根据由 DEM 获得的高度进行估算。在后面的小节中 我们将进一步看到,在所选区域足够小时, $\phi_a(x)$ 可以用一个线性的模型来表示, 而 $\phi_\mu(x)$ 则可以表示成一个时间的函数。在本章第四小节中,我们将给出这一相 位模型变化后的矩阵形式。

3.1.2 PS 处理的主要过程

PS 技术的处理过程在总体上可以分为如下几个步骤:

(一)干涉图生成:

给定 *K*+*I* 幅 SAR 图像,我们首先选择一幅图像作为主图像,其它的图像作为辅图像。选择主图像应该考虑到基线,相对其它图像的采集时间,季节等因素[37];如果分析的结果表明主图像的相位受大气影响很大,则应该考虑其它的图像作为主图像。选定了一幅主图像和其它 *K* 幅辅图像,就可以生成 *K* 幅干涉图,同时获得相干图,重采样后的辅图像等。在生成干涉图的同时,还应该去掉平地效应引起的相位。另外在生成干涉图的过程中,还应该获得基线、轨道参数和图像的采集时间差也就是时间基线,便于以后的处理。

(二) PS 点的检测

PS 技术研究的对象不是整幅干涉图像,而是干涉图像中具有一定相干性的 点,即 PS 点。因此, PS 点的选择对于以后的沉降计算等至关重要。一方面,我 们希望尽可能选择更多的 PS 点;另一方面,我们要避免错误地选入其它点作为 PS,造成结果的偏差。关于 PS 点的选择,我们将在下一节中详细介绍。



图 3.1: 整景图像干涉处理实例,实验选择北京地区的 13 幅 ERS 图像,包括 12 幅 ERS2 图像和 1 幅 ERS1 图像。图为一组干涉数据,其中幅度图上的红色矩形 区域为实验区域,两幅图像的获取时间分别为:主图像获取于 98/09/02,辅图像获取于 99/06/09,垂直基线为: 52.5*m*,高度模糊数为: 167.2*m*。(左:干涉幅度 图;右:干涉相位图)



图 3.2:北京城区的一小块区域。此区域中心纬度为 39.9 N,中心经度为 116.35 E, 区域大小为 1000x1000 个像素,对应于实际大小约为 5x20km²。此区域对应于图 3.1 同一组干涉图像对的矩形区域,同时生成干涉幅度图和相位图,未进行多视

处理(左:干涉幅度图;右:干涉相位图)

(三) 地形相位的去除

在生成干涉图的同时,我们已经去除了平地相位。为了使干涉相位能够更 接近形变相位,我们也希望能够去掉地形相位。根据式(3.1.2),我们希望获取地 表高度 q。我们可以根据已有的 DEM 得出高度 q 的估计值 â,从而得出地形相 位的一个估计值。在最后一步方程求解过程中,我们可以进一步修正估计值 â, 得到 DEM 的估计误差。这一步在一些资料中也叫做插分干涉图生成,或者 零距 离基线逼近[1]。事实上,我们完全可以在这一步只考虑 PS 点的地形相位,这样 可以减少一定的工作量。

(四) 系统方程的求解

在去掉平地相位和地形相位之后,剩余的相位成分包括大气相位 (APS), 形变相位,由高度误差引起的地形相位误差,噪声相位等。在假定形变随时间 变化的模型(比如线性模型)极大气相位模型的情况下,我们就可以根据剩余的相 位反求出地表的形变规律,DEM 误差,大气相位等成分。本文最后一节将详细 介绍求解系统方程的迭代算法,并且给出一个改进后的算法。

3.2 PS 点的检测

在整个 PS 技术的处理过程中,主要算法的实现是在选取的 PS 点上进行的。 因此, PS 点的选择对整个处理过程的意义至关重要。在选择 PS 点时,我们要综 合考虑本章 3.1 小节中提出的两方面。在目前的 PS 点检测的算法中,主要有利 用相干性和利用幅度两种算法。本小节首先对已有算法做以介绍,然后我们提 出一种新的自适应的 PS 点检测算法。

3.2.1 已有的技术

我们首先介绍基于相干性和幅度的两种算法,最后介绍信噪比 SCR (Signal to Clutter Ratio) 在 PS 点检测中的应用。

i. 基于相干性的算法

根据永久散射体的概念,我们很容易想到,如果某点在所有干涉图中表现 出很强的相干性,则这个点就可以认为是 PS 点。基于相干性的 PS 点算法正是 出于这一点考虑。这种方法首先要设定一个阈值,如果某个像素点的所有相干 值大于这一阈值,则认为这个点是 PS 点,否则不是。我们首先回顾一下相干性 的概念。假设我们有两幅 SAR 图像 *I*₁(*x*, *y*), *I*₂(*x*, *y*):

$$I_{1}(x, y) = A_{1}(x, y)e^{j\phi_{1}(x, y)}$$
(3.2.1)

$$I_2(x, y) = A_2(x, y)e^{j\phi_2(x, y)}$$
(3.2.2)

 $A_1(x, y), A_2(x, y)$ 表示它们的幅度值, $\phi_1(x, y), \phi_2(x, y)$ 表示它们的相位值, 那么相干值可以表示为:

$$\gamma(x, y) = \frac{\left|\sum A_1(x, y)A_2(x, y)e^{j\phi_1(x, y) - j\phi_2(x, y)}\right|}{\sqrt{\sum A_1^2(x, y)}\sqrt{\sum A_2^2(x, y)}}$$
(3.2.3)

其中符号 天 表示在某一窗口内取空间平均。

这种方法简便,容易实现,但是也有很大的局限性。首先,从式(3.2.3)可以 看到,在计算像素的相干值时,必须在某一个窗口内对数据进行空间平均,这 样相邻像素的特性对于本像素的相干性影响很大。其次,对于大基线的图像对, 根据前边的讨论我们可以看到基线引起的去相关非常大,即使像素点本身表现 出非常强的稳定特性,在这种情况下表现出来的相干值也会仍然很低,因而很 容易漏选掉这些点。

根据以上的讨论,我们在利用相干性选择 PS 点时,第一要考虑选择合适的窗口尺度。窗口尺寸越大,估计精度越高,但是分辨率会降低,检测率也会随之下降。第二,根据 PS 选择的两个基本原则,也要选择合适的阈值。

在图像数量不多,并且时间距离基线都不是很大的情况下,适合使用相干

性的算法;反之则适宜用下面的算法:基于幅度的 PS 点检测算法。

ii. 基于幅度的算法

根据 PS 的基本概念, PS 点的选择依据一般是寻找相位稳定的点做为 PS 点。 然而,在有足够数量的图像的情况下,我们完全可以根据幅度的偏移来估算出 相位的偏移。也就是说利用幅度图来进行 PS 点的检测,只要像素表现出很稳定 的振幅序列,我们就可以认为它是 PS 点。

为此,我们首先研究幅度偏移和相位偏移之间的关系。假定PS点的反射率 是g,g>0,为一正实数。假设噪声为复高斯噪声n,它的实部和虚部分别为 n_R 和 n_I , 能量为 σ_n^2 ,则幅度值a的概率密度函数是:

$$f_{A}(a) = \frac{a}{\sigma_{n}^{2}} I_{0} \left(\frac{ag}{\sigma_{n}^{2}} \right) \exp\{-(a^{2} + g^{2})/2\sigma_{n}^{2}\}$$
(3.2.4)

上式为一Rice分布,其中 I_0 是修正的贝塞尔函数。信噪比 $SNR=g/\sigma_n$ 决定了 Rice分布的形状。对于低SNR的情况,Rice分布接近于瑞利分布,只取决于噪声 变化方差 σ_n^2 ;对于高SNR的情况($g/\sigma_n>4$),幅度值A的分布函数接近高斯分布。 在满足 $\sigma_n \ll g$ 的情况下,则有:

$$\sigma_A \approx \sigma_n = \sigma_{nR} = \sigma_{nI} \tag{3.2.5}$$

另一方面,相位的偏移可以估计为:

$$\sigma_{v} \approx \frac{\sigma_{nl}}{g} \approx \frac{\sigma_{nl}}{m_{A}}$$
(3.2.6)

以上两式中, m_A 和 σ_A 分别是幅度的均值和偏差。根据以上两式,我们可以进一步得出:

$$\sigma_{\nu} \approx \frac{\sigma_{A}}{m_{A}} \equiv D_{A} \tag{3.2.7}$$

由式(3.2.7)我们可以看到,可以根据幅度图来估计相位的偏差。只要信噪比 SNR 足够高,我们就可以利用幅度的偏差与均值的比值来作为相位偏差σ_ν的估 计。因此利用幅度图来选择 PS 点的算法就是对所有的图像的幅度图,计算每一 个像素偏差和均值,然后利用(3.2.7)的比值作为评价指标,选择一个合适的阈值。 如果结果小于这一阈值,就说明该像素的相位偏差足够小,因此可以选择该点 做为 PS 点。一般情况下,当 D_A <0.25 时,选择该点为 PS 点就可以满足 PS 处理的要求。

在处理过程中,必须严格地对个幅图像进行重采样处理,使得主图像上的 某一像素严格对应各辅图像的响应像素。另外在用幅度图进行 PS 检测之前,必 须对个图像进行校正。事实上,我们可以不必考虑后向散射系数,并且我们只 需求出 (3.2.7)中的比值,相对的参数校正就可以满足我们处理的要求。此校正 参数取决于传感器类型、数据的获取以及处理数据的中心。对于 ERS 数据,这 个参数可以在 ESA 的网站上查到[38]。假定校正前的幅度值为 A₀(x),给定校正 参数 K,则校正后的幅度值 A(x)可以表示为:

$$A(x) = \frac{A_0(x)}{K}$$
(3.2.8)

iii. 信噪比 SCR(Signal to Clutter Ratio)在 PS 点检测中的应用

N.Adam 用信噪比 SCR 来进行 PS 点的检测[39],他给出了利用上述介绍中的评价指标 *D*_A来估计 SCR 的方法。

如果在干涉的去相干因素中不考虑热噪声,则实际测得相位的误差φ由SCR 来决定。实际上,像素实际测得相位的误差φ的概率密度函数可以表示为:

$$f(\varphi) = \frac{\sqrt{SCR} \left| \cos(\varphi) \right|}{\sqrt{\pi}} e^{-SCR \sin^2(\varphi)}$$
(3.2.9)

从(3.2.9)中我们可以看到, 在 $\varphi = 0$ 附近, 当 SCR 增大时, $f(\varphi)$ 也随之增大, 也就是说, SCR 越大, 相位误差 $\varphi \rightarrow 0$ 的概率就越大, 即测得的相位误差就会越 小。因此我们可以得出结论:只要某个像素的 SCR 足够大, 我们就可以选择该 点作为 PS。

(3.2.9)适用于 SCR>3 的情况并且在 SCR 接近 2 的时候仍然有效。必须指出的是,上式中的概率密度只是考虑 φ 在 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 之间的情况。对于相位误差在 $-\pi$ 到 π 之间的情况,则概率密度函数更为复杂一些,但相位误差随 SCR 变化的规律基本相同。特别地,在 SCR \rightarrow 0时,相位误差的分布表现为均匀分布。

有两种方法可以用来估算 SCR。第一种方法是直接根据 SCR 的概念,根据 附近的像素估计噪声。这种方法原来是用于检测角反射体(Corner Reflectors)的相

位稳定性[40]。与利用相干性估计的方法类似,这种方法需要一个空间估计窗口, 使得它估计的空间分辨率受到限制,像素周围的点对像素影响效果非常显著。 因而这种方法同样要选择适当的估计窗口。根据式(3.2.8)及随机数学知识,我们 能够知道由 SCR 引起的相位偏差是:

$$\sigma_{\varphi}^{SCR} = \frac{1}{\sqrt{2SCR}} \tag{3.2.10}$$

第二种是利用幅度图来估计 SCR。首先根据幅度偏差和均值的比来估算相 位偏差,然后进一步根据相位偏差来确定 SCR。这种方法属于时间平均,像素 周围的点对像素本身没有什么影响,因而适合时间序列中的 PS 点的检测。我们 已经知道,相位偏差可以用幅度值估计为:

$$\sigma_{\varphi}^{D_A} \approx D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \tag{3.2.11}$$

结合(3.2.10)与(3.2.11)我们可以得到:

$$SCR = \frac{1}{2} \left(\frac{m_A}{\sigma_A} \right)^2 \tag{3.2.12}$$

应该指出两种方法的估计得到的相位偏差都是有偏的。随着 SCR 的减小, 相位偏差增大,两种方法估计的误差都会增大。以前一种方法比,用幅度图估 计得到的偏差相对较小。并且随着图像数目的增多,估计的结果越接近实际值。 因而在图像数目足够多的情况下,可以首先考虑选择幅度图估计的方法。

3.2.2 一种新的自适应 PS 点检测算法

通过前边对两种 PS 点检测算法的比较,我们选择使用幅度图估计的方法。 然而在实际处理过程中我们注意到,有些点虽然平均幅度值很低,却表现出很 稳定的幅度统计特性,比如水体上的一些点。也就是说,这些点有很低的幅度 平均值,但是幅度偏差相比而言更低,结果是估算得到的相位偏差很低。一般 而言,这些点都有很低的相干性,不利于我们进一步处理,我们应该在进行 PS 的选择时排除这些点。 基于如上原因,我们考虑另外增加一个幅度阈值*T_A*,如果像素点的幅度值 小于此阈值,则此像素点不会被选做 PS。下面的问题就是如何选择幅度阈值*T_A*。 SAR 图像的幅度值受雷达传感器的类型,地表物体的反射特性,传感器与反射 体之间的距离等多方面因素的影响。不同的图像和同一图像不同区域,幅度值 的差别可能很大,很难确定一个通用的幅度阈值。为此,我们引入了"幅值滤 波器"这一概念,提出了自适应于实验数据的幅度阈值算法,根据所选区域确 定一个相对的幅度阈值。

我们考虑由幅度的平均值构成的"平均幅度图",并且暂时不考虑相位偏差的阈值。假定这个"平均幅度图"有N个像素,我们可以把这N个幅度值按照由大到小的顺序排成一个幅度值序列 $\{A_n\}(n=1,2,\cdots N)$,其中 $A_1 \ge A_2 \ge \cdots \ge A_N$ 。我们的考虑是只有这一序列的前若干个元素才有可能被选做 PS 点。比如如果有 $A_L > T_A > A_{L+1}$,则只有前面L个点有机会被选做 PS 点。

我们现在考虑 L 与 N 的比值:

$$\frac{L}{N} = \nu\% \tag{3.2.13}$$

在我们的方法中,我们是根据百分比*v*%及式(3.1.14)来确定可能成为 PS 点的个数 *L。*从式(3.2.13)可以看到,在幅度值序列{*A_n*}(*n*=1,2,…*N*)中只有前边 *L* 个幅度值较高的点才有可能被选做 PS 点,而后边(*N*-*L*)个点,也就是占百分比 1-*v*% 的点则被滤掉,这就是幅度滤波器的概念。在确定了*v* 值和 *L* 的值以后,我们就可以进一步确定幅度阈值 *T_A*。

幅值滤波器v的值很难在理论上确定,这个值主要靠经验来确定。大部分的 PS 点都能够表现出较高的幅度特性,只有个别情况才会出现幅度值很低的现象, 因此一般取v=1~5就可以满足 PS 处理的需要。



图 3.3 幅度图的直方图

我们也可以从直方图来考虑这个问题。如图 3.3,横坐标表示幅度图中的幅度值,我们取对数值以便于观察,纵坐标表示对应幅度值的图像中点的个数。 假定横轴上有一点 P,它左侧的直方图与横轴围成的面积为 S_1 ,它右侧的直方 图于横轴围成的面积为 S_2 ,另有 $S = S_1 + S_2$,则 S_1, S_2 分别表示幅度值小于和大 于该点的像素个数,而 S表示总面积。对于给定的值 ν ,我们就是要求这样一点 P,使它满足如下的关系式:

$$\frac{S_2}{S} = \nu\%$$
 (3.2.14)

我们可以利用迭代的算法根据v的值来确定幅度阈值T_A,具体算法可以描述为:

(1) 给定幅值滤波器 ν 的值及对应允许误差 ε_{ν} 和阈值收敛误差 ε_{T} , 令 n=0, $T_{\min}^{(n)} = 0, T_{\max}^{(n)} = \max\{A_n\}, T_A^{(n)} = (T_{\min}^{(n)} + T_{\max}^{(n)})/2;$

(2) 计算平均幅度图中幅度值小于 $T_A^{(n)}$ 的元素个数 $L^{(n)}$,及这些元素占总数的百分比 $\nu^{(n)}$ % = $L^{(n)}/N$;

(3) 如果 $|v^{(n)} - v| < \varepsilon_v$,或者 $|T_{\max}^{(n)} - T_{\min}^{(n)}| < \varepsilon_T$ 则算法结束, $T_A = T_A^{(n)}$,否则转入下一步;

(4) 如果 $v^{(n)} < v$, 则 $T_{\min}^{(n+1)} = T_A^{(n)}, T_{\max}^{(n+1)} = T_{\max}^{(n)}, T_A^{(n+1)} = (T_{\min}^{(n+1)} + T_{\max}^{(n+1)})/2$, n = n + 1, 转入第(2)步, 反之如果 $v^{(n)} > v$, 则 $T_{\min}^{(n+1)} = T_{\min}^{(n)}, T_{\max}^{(n+1)} = T_A^{(n)}$, $T_A^{(n+1)} = (T_{\min}^{(n+1)} + T_{\max}^{(n+1)})/2$, n = n + 1, 转入第(2)步

在确定了幅度阈值之后,我们就可以根据保留下来的可能成为 PS 的这些点 及式(3.1.8)提供的准则做进一步选择,选出我们最终需要的 PS 点。

3.2.3 实验结果及分析

在 3.1.2 小节中,我们已经选择了数据,并且生成了干涉图,同时去除了平 地相位。

在生成干涉图的同时,我们已经对各辅图像进行了重采样处理,使得各辅 图像上的像素与主图像上的像素严格一一对应。为了进行 PS 点的选择,还必须 对各图像的幅度值进行相对的校正。在我们所使用的图像中,只有一幅 ERS1 图 像校正参数 *K*=65026.0,而对于所有其它 ERS2 图像,均有 *K*=93325.3。

利用校正后的 ERS 幅度图,我们分别在没有使用幅值滤波器,和幅值滤波器 器v=5,2,1等情况下进行了 PS 点的检测实验。图 3.4 给出了在不同的情况下 PS 点的分布情况。为了便于演示,我们只给出了实验区域的一部分分布,其中 PS 点的个数为实验区域的总数,以下同。



图 3.4.a: 没有使用幅值滤波器(实验区域共 600 PSs)



图 3.4.b: 幅值滤波器 v=5 (实验 区域共 467 PSs)

3.4.c: 幅值滤波器v=1(实验区 域共 305 PSs)

图 3.4: 在不同情况下的 PS 点的分布, 截取自实验区域的一部分

在图 3.4 中,我们注意到矩形区域内为一水域,对应于实际情况幅值很低, 相干性亦很小。3.4.b 及 3.4.c 与 3.4.a 相比,矩形区域内的点从 4 个减少到 1 个, 可见幅值滤波器对这些点起到了有效的抑制作用。图 3.5 给出了 PS 点的个数随 着幅值滤波器 v 的增长而变化的情况。



图 3.5: PS 点的个数随幅值滤波器 v 变化的情况。

干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用



图 3.6: 区域 2 中 PS 点的分布随着幅值滤波器变化的情况,截取自实验区域的一部分(左:没有幅值滤波器,实验区域共 442 PSs,中:幅值滤波器 ν = 5, 实验区域共 338 PSs,右:幅值滤波器 ν = 1,实验区域共 237 PSs)

另一块实验区域选在前者略偏北一些的位置,中心经度116.35 E,中心纬度 39.97 N。用表 3.1 中所列的ERS数据选择了1200x300 的图像区域,实际大小约 为 5x6km²。用与前边类似的方法我们生成了干涉图并进行了PS点的检测。图 3.6 给出了PS点的分布随幅值滤波器的变化情况。

最后一个问题是相干性检测和幅度值检测的比较。对应于第一块区域,图 3.7 以幅值滤波器 v = 5 时为参照,分别给出了相干值为 0.85,0.8,0.75 时的结 果。为更明显地突出比较,此处为实验区域中区别于图 3.4 的一部分。PS 点个 数的含义同上,为实验区域 PS 点总数。





第三章 永久散射体技术



图 3.7 第一块区域幅度值的结果与相干值的结果的比较,截取自实验区域的一部分(左上:幅度值检测的结果, *D_A* < 0.20, *v* = 5,实验区域共 467PSs,右上:相干值检测的结果,相干阈值 0.75,实验区域共 763PSs,左下:相干值检测的结果,相干阈值 0.80,实验区域共 394PSs,右下:相干值检测的结果,相干阈值 0.85,实验区域共 170PSs)

图 3.8 则给出了第二块区域的比较结果:



图 3.8 第二块区域的幅度值的结果与相干值的结果的比较,截取自实验区域的 一部分(左一:幅度值检测的结果, *D_A* < 0.20, *v*=1,实验区域共 237PSs, 左二: 相干值检测的结果,相干阈值 0.75,实验区域共 460PSs, 右二:相干值检测的 结果,相干阈值 0.80,实验区域共 251PSs, 右一:相干值检测的结果,相干阈 值 0.85,实验区域共 116PSs)

最后,图 3.9 将第一块区域的幅度值结果和相干阈值为 0.8 时的结果放在一起,以便比较和说明。

图 3.9 中,矩形点表示相干性检测的结果,圆形点表示幅度值检测的结果, 它们的重叠部分在图中则表现为高亮度显示。分析图 3.9 我们可以看到,两种结 果有一些点完全重合在一起,说明结果的有效性。还有一些点两种结果存在几 个像素的偏移,原因是在估算相干值时要考虑空间平均窗口,从而降低了空间 的分辨率,由此可能产生几个像素以内的误差。在理论上讲,幅度值估计的结 果更为可靠一些。

另外我们还应该看到,有相当一部分幅度值检测的结果在相干性检测中并 没有被选做 PS 点,这些点附近也没有在相干性检测中被选中的点。合理的解释 是这些点受基线等去相干因素的影响比较大,虽然这些点表现出了稳定的反射 特性,在大基线及一定的地形坡度角的条件下,仍然表现出很低的相干性,在 相干性选择时这些点则被忽略掉。因此,从这个角度来考虑,幅度值的估算方 法略优一些。



3.9: 第一块区域幅度值结果($D_A < 0.20$, $\nu = 5$)和相干阈值为 0.8 时的结果

在同一张图上的比较。矩形表示相干性检测的结果,圆形表示幅度值检测的结

果

除此之外,还有一些点在相干性检测中被选中而没有在幅度值检测中被选中。事实上,通过幅度值来估算相位偏差的准确度是和图像的数量密切相关的。 在图像数目比较小的情况下,这种估计结果的误差可能比较大,有可能漏选一 些本身相位稳定性比较好的 PS 点。这是用幅度值检测 PS 点的不足之处。因此, 为了提高结果的准确性,应该尽可能使用更多的图像。

3.3 地形相位的去除

在生成干涉图的同时,我们已经去除了平地效应引起的相位。为了便于进一步处理,我们还必须去掉地形引起的相位。由于我们已经进行了 PS 点的选择,故为了减少计算时间,我们只需计算在这些 PS 点上的地形相位。前边已经给出了地形相位和高度之间的关系,现把此关系式重新列出如下:

$$\phi_q(x) = \frac{4\pi}{\lambda R(x)} B_n \frac{q(x)}{\sin \theta(x)}$$
(3.3.1)

其中 B_n 在生成干涉图的过程中即可求得,对于给定像素 $x = (\xi, \eta)$,我们在这一步需要计算的参数有高度 q(x),传感器与像素点间的距离 R(x)以及基于椭球模型的入射角 $\theta(x)$ 。在给定 DEM 及卫星轨道参数已知的情况下,我们可以分别求得这三个参数。

i. 高度*q*(*x*):

高度可以从给定的 DEM 数据中直接或间接获得。一般来讲, SAR 图像与 DEM 数据的分辨率有所不同,即使是相同的情况下,他们的分辨率单元的中心 也很难一一对应。因此需要采用间接插值的方法。最简单的方法是线性插值, 找出 SAR 图像中的某点在 DEM 中对应点的周围四个像素的高度值,即可根据 线性插值的算法估算出该点的高度值。PS 处理过程中对高度误差的要求不高, 只要小于 20 米即可。在后边的处理中我们还可以看到最后的结果将给出高度的 误差值 Δq(x)。因此,简单的线性插值一般就可以满足处理的要求。

我们选用的 DEM 数据是以经纬度坐标的形式给出的。因此,我们在进行插 值处理之前,还要将像素在图像中的坐标转换成经纬度坐标。主要过程是:利 用迭代算法及第二章中的(2.2.1)-(2.2.3)将像素在图像中的坐标转换成地心空间 坐标(*X*,*Y*,*Z*),然后再利用地理编码的理论将地心空间坐标转换成经纬度坐标。 在我们的实验中,我们是利用 Doris 软件来实现从像素坐标到经纬度之间的转换 [20,21]。

ii. 距离*R*(*x*):

距离可以根据物理原理求出。假定各行第一个像素的距离向时间是 t_{r1} ,对于像素 $x = (\xi, \eta)$,它的距离向时间可以表示为:

$$t_r = t_{r1} + \frac{\eta - 1}{RSR}$$
(3.3.2)

其中 RSR 是距离采样频率,于是我们可进一步求得距离 R(x):

$$R(x) = \frac{1}{2}ct_r$$
(3.3.3)

注意(3.3.3)中的系数 1/2, 原因是式(3.3.2)表示的时间是双向距离时间。 iii. 入射角*θ*(*x*) 与前边两个参数比较,如射角的求解略显复杂一些。在给定地球椭球模型的相关参数的条件下,我们可以利用向量的几何关系来求得入射角*θ*(*x*)。

图 3.10 直观的给出了入射角及向量之间的关系:



图 3.10: 入射角与向量间的几何关系

在图 3.10, $\overline{X_s}$ 表示卫星的位置矢量。为了获得这个量,我们首先要根据像素所在的行数和第一行的方位时间来求得该像素的方位像时间,对于像素 $x = (\xi, \eta)$,类似于(3.3.2),它的方位向时间可以表示为:

$$t_a = t_{a1} + \frac{\xi - 1}{PRF}$$
(3.3.4)

(3.3.4)中 t_{a1} 表示第一行的方位向时间。在求得了像素的方位向时间后,我们可以根据精确轨道数据并且采用插值的方法,来估算出像素点对应的卫星位置矢量 $\overline{X_s}$ 。

X 表示像素点在地心空间坐标系中的位置矢量(X,Y,Z),前面已有过简单介绍,这里不做赘述。

在求得了上边两个矢量后,我们就可以根据几何关系,求出入射角:

$$\theta = \arccos \frac{\overline{(X_s} - \overline{X}) \bullet \overline{X}}{\left| \overline{(X_s} - \overline{X}) \right| \left| \overline{X} \right|}$$
(3.3.5)

有了上述三个参数,我们就可以根据式(3.3.3)估算出地形相位。在去掉地形 相位后,由高度误差带来的地形相位误差会保留在剩余的相位中,而在最后的 方程求解过程中,我们将进一步求出高度误差。本章的后面小节中将详细介绍 方程的求解方法。

3.4 城市沉降计算

3.4.1 求解地表沉降的最优化算法

在进行了 PS 点的检测,地形相位的去处之后,相位剩余的部分包括大气相 位 APS,高度误差产生的相位,地表形变相位以及随机相位噪声。在参数已知 的情况下,我们就可以根据系统的模型反求得大气相位,DEM 的高度误差和地 表形变在 LOS 方向上的规律。本节的主要目标是用 PS 技术来研究地表的形变 规律,并且应用于城市沉降方面的估算。本小节主要介绍 A.Ferretti 的最优化算 法[1],并且对 B.Kampes 的差分网络模型算法也作简单的介绍[41]。

(一) A.Ferretti 等人的最优化算法

假定我们生成了 *K* 幅干涉图,并且在 PS 的选择这一步中选定了 *H* 个点作为 PS 点。现在我们对式(3.1.2)作如下考虑:

i. 在所选区域不是很大的情况下,大气相位 APS 可以用方位向位置和距离向位置的线性函数来近似,而对于 APS 的非线性部分,则可以认为是噪声的一部分;

ii. 由平地效应引起的相位已经在干涉图生成的过程中去除;

iii. 在利用 DEM 数据去掉地形相位后,令高度误差 $\Delta q(x) = q(x) - \hat{q}(x)$,则 剩余的相位中包括由高度误差 Δq 引起的相位 $\Delta \phi_a(x)$;

iv. 假定地表形变为线性形变,则形变相位可以表示为时间的线性函数。

基于以上考虑,我们可以将(3.1.2)做适当变形并且最后写成矩阵的形式:

$$\Delta \phi = a \mathbf{1}^T + p_{\varepsilon} \xi^T + p_n \eta^T + B \Delta q^T + T v^T + E$$
(3.4.1)

式(3.4.1)实际上是一个 K×H 的矩阵, 它的参数具体含义表示如下:

已知的参数有:

- $\Delta \phi[K \times H]$: 干涉相位去掉平地相位和地形相位后剩余的部分;
- *ξ*,η[*H*×1]: 方位向位置和距离向位置;
- *B*,*T*[*K*×1]: 与垂直基线和时间基线相关的两个系数,其中

$$B = \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B_n \qquad (3.4.2)$$
$$T = \frac{4\pi}{\lambda} B_T \qquad (3.4.3)$$

(3.4.3)中, B_T表示时间基线。

未知的参数有:

- *a*, *p*_ξ, *p*_η[*K*×1]: 大气相位的常数项及在方位向和距离向上的一次项系数:
- *∆q*[*H*×1]: DEM 高度误差;
- *v*[*H*×1]: LOS 方向上的形变速度;
- *E*:剩余的相位噪声。

从表面上看,式(3.4.1)貌似一线性方程,可以用最小二乘等算法求得最优解。 然而,我们注意到方程左端的相位是在-π到π之间,与实际相位相差2π的整数 倍。因此方程(3.4.1)为一非线性方程,我们必须寻找相应的求解办法。

A.Ferretti 等人给出了方程(3.4.1)的一个迭代算法, 前提是要满足如下一些条件:

- (1) 信噪比足够高;
- (2) 对于图像上某一点,地表形变的速度是一常量,也就是地表形变的大小

是时间基线的正比列函数;

(3) APS 可以用(3.4.1)中的线性模型来近似

我们在本章前面的小节中已经看到,在进行 PS 点的选择时,就已经保证了 PS 点满足一定的信噪比,只要选择合适的阈值,就可以保证信噪比足够高。对 于(3),在所选区域比较小的条件下,APS 可以近似为方位向位置和距离向位置 的线性函数,而其非线性部分则可以认为是噪声的一部分。而对于(2),地表形 变的规律非常复杂,一般来讲(2)很难满足,但是我们可以认为非均匀的形变速 度可以分成平均的形变速度和随机噪声两部分,而后一部分的相位贡献可以认 为是在(3.4.1)的噪声项中,并且可以通过滤波等方式将这一部分非均匀形变速度 提取出来。关于这方面的内容,其它文章中有所介绍[42]。

求解方程(3.4.1)的迭代算法具体过程可以表示如下:

(1) 令 *n* 为迭代次数,给出最大迭代次数 N_{max} , $\Delta q, v$ 的收敛阈值 T_q, T_v 。初始化 n = 0, $\Delta \phi^{(0)} = \Delta \phi$, $\Delta q^{(0)} = \delta q^{(0)} = v^{(0)} = \delta v^{(0)} = 0$

(2) 更新迭代次数 n 和未知量 Δq 及 v 的值:

$$n = n + 1$$

$$\Delta q^{(n)} = \Delta q^{(n-1)} + \delta q^{(n-1)}$$

$$w^{(n)} = w^{(n-1)} + \delta w^{(n-1)}$$

(3) 在n>1时,如果同时满足:

$$\begin{split} \left\| \Delta q^{(n)} - \Delta q^{(n-1)} \right\|_{\infty} < T_q \\ \left\| v^{(n)} - v^{(n-1)} \right\|_{\infty} < T_v \end{split}$$

其中 $\|x\|_{\infty} = \max\{|x_k|\}_{k=1}^{H}$,或者 $n = N_{\max}$,那么我们认为算法已经结束, $\Delta q = \Delta q^{(n)}, v = v^{(n)}$

(4) 在相位Δφ中去除和Δq⁽ⁿ⁾及v⁽ⁿ⁾有关的部分:

$$\Delta \phi^{(n)} = \Delta \phi - (b \cdot \Delta q^{(n)^T} + T \cdot v^{(n)^T})$$
(3.4.4)

(5) 考虑 $\Delta \phi^{(n)}$ 的第k行,估计 $\{a_k^{(n)}, p_{\xi k}^{(n)}, p_{\eta k}^{(n)}\}$ 的值,令:

$$\Gamma_{k}^{(n)} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^{H} \exp(j\phi_{kh}^{(n)} - j(p_{\xi k}\xi_{h} + p_{\eta k}\eta_{h}))$$
(3.4.5)

则有:

$$\left\{ p_{\xi k}^{(n)}, p_{\eta k}^{(n)} \right\} = \arg \max_{p_{\xi k}, p_{\eta k}} \left\{ \left| \Gamma_k^{(n)}(p_{\xi k}, p_{\eta k}) \right| \right\}$$
(3.4.6)

$$a_k^{(n)} = \measuredangle \Gamma_k^{(n)} \tag{3.4.7}$$

(6) 进一步去掉相位Δφ⁽ⁿ⁾的线性部分:

$$\Delta \phi_{res}^{(n)} = \Delta \phi^{(n)} - (a^{(n)} \mathbf{1}^T + p_{\xi}^{(n)} \xi^T + p_{\eta}^{(n)} \eta^T)$$
(3.4.8)

(7) 对 $\Delta \phi^{(n)}$ 的第h列,估算 $\Delta q \otimes v$ 的误差 $\{\delta q_h^{(n)}, \delta v_h^{(n)}\}$,用与第(5)步类似的方法,并且以 $|\Gamma_k|$ 做权重,令:

$$\gamma_h = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \left| \Gamma_k^{(n)} \right| \exp(j\Delta \phi_{res_{kh}}^{(n)} - j(B_k \delta q_h + T_k \delta v_h))$$
(3.4.9)

则有:

$$\left\{\delta q_h^{(n)}, \delta v_h^{(n)}\right\} \arg \max_{\delta q_h, \delta v_h} \left\{\left|\gamma_h(\delta q_h, \delta v_h)\right|\right\}$$
(3.4.10)

转到步骤(2)。

在首次迭代时可以选择时间与距离基线较小的图像做为对象,在对Δq及v 有了一个初步的估计之后,再以所有图像作为运算对象。A.Ferretti 等人的实验 结果表明,在 500 个左右 PS 点时, 10 次迭代左右即可达到收敛。

〇 B.Kampes 的基于差分网络模型的算法

B.Kampes 等人提出了一个基于差分网络模型求解地表形变的方法[41]。我 们现将此方法做一简单介绍。 仍然考虑式(3.1.2)中的相位模型,类似于前边的处理方法,去掉平地相位和 估计得到的地形相位,则剩余的相位可表示为:

$$\Delta\phi(x) = \phi_{\Delta h}(x) + \phi_{\mu}(x) + \phi_{a}(x) + \phi_{\sigma}(x) \qquad (3.4.11)$$

其中
$$\phi_{\Delta h}(x) = \beta_x \Delta h(x)$$
, $\phi_{\mu}(x) = \frac{4\pi}{\lambda} \mu(x)$, 其中 $\mu(x)$ 表示 LOS 方向上的形

变。与前面的方法不同的是, 现在考虑形变 μ(x) 是时间和像素位置的二元函数:

$$\mu(x,t) = \sum_{d=1}^{D} \alpha_d(x) \cdot p_d(t)$$
 (3.4.12)

上式中 $p_d(t)$ 表示基函数,D表示基函数的个数。 $\alpha_d(x)$ 则表示基函数的系数, 它是像素位置 $x = (\xi, \eta)$ 的函数,对不同的像素, $\alpha_d(x)$ 一般有着不同的值,也就 是说在不同的像素位置上有着不同的形变规律。根据实际情况,我们可以选择 不同的基函数,比如D=3时,最简单的基函数就是:

$$p_1(t) = t \tag{3.4.13}$$

$$p_2(t) = t^2 \tag{3.4.14}$$

$$p_3(t) = t^3 \tag{3.4.15}$$

特别地,当D=1, $p_1(t)=t$ 时,实际上就是线性模型。

现在我们考虑同一幅干涉图像 k 中两个像素 x, y 之间的相位差。在这两个像 素空间距离足够小的条件下,可以认为它们的干涉相位中的大气相位 APS 的差 足够小,甚至可以小于随机的相位噪声。因此在这两个像素的差分相位中可以 把 APS 的差认为是相位噪声的一部分。根据式(3.4.11)我们可以得到:

$$\Delta \phi_{x,y}^{k} = 2\pi a_{x,y}^{k} + \beta_{x}^{k} \Delta h_{x,y} + \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{d=1}^{D} (\alpha_{d}(y) - \alpha_{d}(x)) p_{d}(t^{k}) + n_{x,y}^{k}$$
(3.4.16)

其中 $a_{x,y}^k$ 是一整数, 对K幅干涉图, 取 $k = 1, 2, \dots K$, 则可得到关于这两个像素的差分矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \phi_{x,y}^{1} \\ \phi_{x,y}^{2} \\ \vdots \\ \phi_{x,y}^{K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\pi & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 2\pi & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 2\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a^{1} \\ a^{2} \\ \vdots \\ a^{K} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} \beta^{1} & p_{D}(1) & \cdots & p_{1}(1) \\ \beta^{2} & p_{D}(2) & \cdots & p_{1}(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta^{K} & p_{D}(K) & \cdots & p_{1}(K) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_{x,y} \\ \alpha_{D}(y) - \alpha_{D}(x) \\ \vdots \\ \alpha_{1}(y) - \alpha_{1}(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{x,y}^{1} \\ n_{x,y}^{2} \\ \vdots \\ n_{x,y}^{K} \end{bmatrix}$$

$$(3.4.17)$$

对(3.4.17)采用最小均方值法则,就可以估计出未知的参数 a^k , $\Delta h_{x,y}$, $\alpha_d(y) - \alpha_d(x)$ 等。

现在我们考虑由很多像素构成的差分网络。以图 3.11 为例,我们只考虑四个点 x, y, p, q,假设我们已经通过(3.4.17)获得了 $\Delta h_{x,p}, \Delta h_{p,q}, \Delta h_{q,y}, \Delta h_{x,y}$,在理论上我们应该有:

 $\Delta h_{x,y} = \Delta h_{x,p} + \Delta h_{p,q} + \Delta h_{q,y}$

(3.4.18)

图 3.11 : PS 点构成的差分网络示例

然而在实际计算中,由于误差的存在使得(3.4.18)一般很难满足,因此,必须对通过(3.4.17)得到的结果进行校正。

以 DEM 高度误差为例,由(3.4.17)得到的结果与实际高度误差的关系可以表示为:

$\left[\Delta h_{x,y}\right]$]	[-1	1	0	0]	$\left\lceil \Delta h_{x} \right\rceil$	
$\Delta h_{x,p}$		-1	0	1	0		Δh_y	
$\Delta h_{y,p}$	=	0	-1	1	0		Δh_p	(3.4.19)
$\Delta h_{y,q}$		0	-1	0	1		Δh_q	
		:	÷	÷	÷	·		

式(3.4.19)中的矩阵系数可以根据具体情况而有所不同,我们可以根据 (3.4.19)采用某一估算法则,比如最小二乘法来估计实际的高度误差Δh_x,Δh_y等 参数。必须指出(3.4.19)估算出的结果是相对于某一参考点的结果,也就是说估 计值和真实值之间相差一常数,原因是(3.4.19)表示的方程并不是唯一解的,要 想估计出参考点的值,或者说与真实值之间相差的常数,还必须利用其他的条 件进行进一步处理。

3.4.2 最优化算法的改进

在通过相干值或幅度值等准则进行了 PS 点的选择,并且去掉了平地相位和 地形相位以后,就可以根据本小节前一部分介绍的算法来求解地表形变速度和 DEM 高度误差等。然而在实际处理中我们发现,方程(3.4.1)的解即使在一个 2π 周期内,也不是唯一的。在图像数目很少的情况下,用前边介绍的迭代算法很 难收敛到正确的结果,甚至很难收敛。假定 $a,\Delta q, v$ 是方程(3.4.1)的一组解,我们 现在考虑另一组参数 $a-kT,\Delta q, v+k1$ 。特别注意其中的"1"表示一列向量,则 方程(3.4.1)的右边为:

$$(a - kT)1^{T} + p_{\xi}\xi^{T} + p_{\eta}\eta^{T} + B\Delta q^{T} + T(v + k1)^{T} + E$$

= $a1^{T} - kT1^{T} + p_{\xi}\xi^{T} + p_{\eta}\eta^{T} + B\Delta q^{T} + Tv^{T} + kT1^{T} + E$
= $a1^{T} + p_{\xi}\xi^{T} + p_{\eta}\eta^{T} + B\Delta q^{T} + Tv^{T} + E$
= $\Delta\phi$
(3.4.20)

从式(3.4.20)我们可以看到, *a*-*kT*, Δ*q*,*v*+*k*1也是满足方程(3.4.1)的一组解。 从而我们可以看到,为获得方程的唯一解,还必须考虑到个未知参数其他方面 的关系,增加约束条件,使方程的解达到唯一。

我们首先考虑对(3.4.1)进行简化,减少未知数的个数,以保证解的唯一性。

为便于说明,我们将(3.4.1)写成矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta \Phi_{11} & \Delta \Phi_{12} & \dots & \Delta \Phi_{1H} \\ \Delta \Phi_{21} & \Delta \Phi_{22} & \dots & \Delta \Phi_{2H} \\ \dots & & & & \\ \Delta \Phi_{K1} & \Delta \Phi_{K2} & \dots & \Delta \Phi_{KH} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_1 & \dots & a_1 \\ a_2 & a_2 & \dots & a_2 \\ \dots & & & & \\ a_K & a_K & \dots & a_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\xi 1} \xi_1 & P_{\xi 1} \xi_2 & \dots & P_{\xi 1} \xi_H \\ P_{\xi 2} \xi_1 & P_{\xi 2} \xi_2 & \dots & P_{\xi 2} \xi_H \\ \dots & & \\ P_{\xi K} \xi_1 & P_{\xi K} \xi_2 & \dots & P_{\xi K} \xi_H \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} P_{\eta 1} \eta_1 & P_{\eta 1} \eta_2 & \dots & P_{\eta 1} \eta_H \\ P_{\eta 2} \eta_1 & P_{\eta 2} \eta_2 & \dots & P_{\eta 2} \eta_H \\ \dots & & & \\ P_{\eta K} \eta_1 & P_{\eta K} \eta_2 & \dots & P_{\eta K} \eta_H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \Delta q_1 & B_1 \Delta q_2 & \dots & B_1 \Delta q_H \\ B_2 \Delta q_1 & B_2 \Delta q_2 & \dots & B_2 \Delta q_H \\ \dots & & & \\ B_K \Delta q_1 & B_K \Delta q_2 & \dots & B_K \Delta q_H \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} T_1 v_1 & T_1 v_2 & \dots & T_1 v_H \\ T_2 v_1 & T_2 v_2 & \dots & T_2 v_H \\ \dots & & \\ K_1 & E_{L1} & E_{L2} & \dots & E_{LH} \\ \dots & & \\ E_{K1} & E_{K2} & \dots & E_{KH} \end{bmatrix}$$

$$(3.4.21)$$

现在我们对式(3.4.19)中的每一行取平均值,可得:

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta \Phi_1} \\ \overline{\Delta \Phi_2} \\ \dots \\ \overline{\Delta \Phi_K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{\xi 1} \\ p_{\xi 2} \\ \dots \\ p_{\xi K} \end{bmatrix} \overline{\xi} + \begin{bmatrix} p_{\eta 1} \\ p_{\eta 2} \\ \dots \\ p_{\eta K} \end{bmatrix} \overline{\eta} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_K \end{bmatrix} \overline{\Delta q} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \dots \\ T_K \end{bmatrix} \overline{\psi} + \begin{bmatrix} \overline{E_1} \\ \overline{E_2} \\ \dots \\ \overline{E_K} \end{bmatrix}$$
(3.4.22)

$$\begin{bmatrix} \widehat{\Delta P_{11}} & \widehat{\Delta P_{22}} & \dots & \widehat{\Delta P_{2H}} \\ \widehat{\Delta P_{21}} & \widehat{\Delta P_{22}} & \dots & \widehat{\Delta P_{2H}} \\ \dots & & & & & & & \\ \widehat{\Delta P_{31}} & \widehat{\Delta P_{32}} & \dots & \widehat{\Delta P_{3H}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{11} - \overline{\Delta P_{1}} & \Delta P_{22} - \overline{\Delta P_{2}} & \dots & \Delta P_{2H} - \overline{\Delta P_{2}} \\ \Delta P_{21} - \overline{\Delta P_{2}} & \Delta P_{22} - \overline{\Delta P_{2}} & \dots & \Delta P_{2H} - \overline{\Delta P_{2}} \\ \dots & & & & & \\ \Delta P_{31} - \overline{\Delta P_{3L}} & \widehat{\Delta P_{3L}} & \dots & P_{3L} (\overline{P_{1}} - \overline{P_{1}}) \\ \dots & & & & & \\ \widehat{\Delta P_{31}} - \overline{\Delta P_{3L}} & p_{22} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{3} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ p_{22} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{22} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{22} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & & \\ p_{22} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{22} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{22} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & & \\ p_{23} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{32} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{22} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & & \\ p_{34} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{34} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{34} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & & \\ p_{34} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{34} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{32} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{4} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{4} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{1} - \overline{\zeta}) & p_{4} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{4} (\underline{\zeta}_{H} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & p_{34} (\underline{\zeta}_{2} - \overline{\zeta}) & \dots & p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) \\ \dots & & \\ p_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & P_{4} (\underline{\zeta}_{4} - \overline{\zeta}) & \dots & P_{4} (\underline$$
写成简化的形式即: $\widehat{\Delta \phi} = p_{\xi} \widehat{\xi}^{T} + p_{\eta} \widehat{\eta}^{T} + B \widehat{\Delta q}^{T} + T \widehat{v}^{T} + E'$ (3.4.24) 其中: $\widehat{\xi} = \xi - \overline{\xi}, \widehat{\eta} = \eta - \overline{\eta}, \ \widehat{\Delta q} = \Delta q - \overline{\Delta q}, \widehat{v} = v - \overline{v}$ 。

比较(3.4.24)与(3.4.1),我们可以发现两者形式上十分相似,但式(3.4.24)没有了常数项,因此可以避免式(3.4.22)中出现的情况,达到了我们的预期效果。 对式(3.4.24),我们完全可以利用本小节中一开始介绍的算法,首先求出 $p_{\xi}, p_{\eta}, \widehat{\Delta q} \widehat{\mu v}$ 。

下面的问题是如何根据我们估计求得的参数进一步求得最终未知参数*a*, Δ*q*和*v*。为了达到这一目的,我们必须考虑其他的条件。为此,我们作如下两 点考虑:

i. DEM 数据的统计特性

一般的情况下,我们可以认为 DEM 数据的高度误差期望值为零,也就是:

$$E\left\{\Delta q_h\right\} = 0 \tag{3.4.25}$$

从而有:

$$\Delta q_h = \widehat{\Delta q_h} + \overline{\Delta q} \triangleq \widehat{\Delta q_h} + E\{\Delta q_h\} = \widehat{\Delta q_h}$$
(3.4.26)

也就是说,我们由式(3.4.24)估计得出的 $\widehat{\Delta q}$ 就可以认为是 DEM 高度误差。

ii. 大气相位 APS 的统计特性

我们注意到我们所用的图像一般时间基线都在一个月以上,因此可以认为 个干涉图的 APS 在时间上是独立的,也就是任何两组干涉图的 APS 都是不相关 的。基于这一点考虑,我们可以认为(3.4.1)中的常数项在不同干涉图中是不相关 的,用数学表达是可以表示为:

$$E\{a_{m}a_{n}\} = E\{a_{m}\}E\{a_{n}\}$$
(3.4.27)

另一方面,我们还可以认为序列 a_n 的样本平均值等于其数学期望,那么 (3.4.25)中的 $E\{a_na_n\}$ 和 $E\{a_k\}$ 可以分别估计为:

$$E\{a_{m}a_{n}\} = \frac{2}{(K-1)(K-2)} \sum_{m} \sum_{n \neq m} a_{m}a_{n}$$
(3.4.28)

$$E\{a_n\} = \frac{1}{K} \sum_n a_n$$
 (3.4.29)

最后,根据方程(3.4.18),我们可以认为a,v的值应该具有如下形式:

$$a = -kT \tag{3.4.30}$$
$$\hat{v} = \hat{v} + k1$$

其中k为待定常数,我们只需将(3.4.30)代入到式(3.4.28)、(3.4.29)中,将 $E\{a_ma_n\}$ 和 $E\{a_k\}$ 表示成为k的函数,最后根据式(3.4.27)来确定k的值。一但确定了k的值,我们就可以随之确定a和v的值。至此,方程(3.4.1)中的所有未知参数都得到了解决。

3.4.3 实验结果及分析

我们最后一步就是根据本节中的算法求出地表沉降的结果。对于第一块实 验区域,中心经度 116.3 E,纬度 39.9 N,我们选择使用幅度值的 PS 点检测结果,并且取幅值滤波器 v=5,相应 PS 点的个数为 467。利用本节中的算法后,最终 求出了 LOS 方向上的移动速度。



图 3.12: LOS(Line of Sight)方向移动速度计算结果(1),中心经度 116.35 E, 纬度 39.90 N,背景为该区域幅度图。

图 3.8 直观的给出了 LOS 方向的移动速度在幅度图上的分布情况。PS 点位 于图中的小圆环的中心,圆环内的灰度值相应地表示移动速度的大小。具有最 低灰度值的像素表示最低的移动速度,相应地表示负方向移动并且绝对值最大, 也就是表示最大的沉降速度,最高灰度值的像素则反之。对于此区域内的点, PS 的 LOS 方向移动速度是在-8mm/year 到 6mm/year 之间。

第三章 永久散射体技术



图 3.13: 对应于两种 PS 选择方法的地表沉降速度结果,上为相干值方法,下 为幅度值方法。

第三章 永久散射体技术

对第二块区域,中心经度 116.35 E,中心纬度 39.97 N。为了便于比较,我 们分别对利用相干值和利用幅度值得到的 PS 点检测结果进行了处理。同时,我 们以北京地区的 quickbird 图像为背景,给出了一个计算结果的直观表示。

图 3.13 中,前者取相干阈值 0.8,后者取*D_A* < 0.20, *v*=1。绿色的点表示 形变方向为下降,而红色的点则表示相反,而其亮度值的大小则反映了速度绝 对值的大小。比较两个结果,我们首先看到在 PS 点的分布上两者有很大的区别, 前者也就是相干值的结果 PS 点的分布表现得比较集中,主要的原因是相干值的 空间平均效应,而后者相对表现得比较分散。从前边的分析,利用幅度值选择 的 PS 点较为可靠一些。从计算的结果上看,两个结果的主要趋势都是下降,前 者的平均沉降速度大小在 LOS 方向为 5.3mm/year,而后者为 2.8mm/year。在速 度大小的分布上看,前者无明显的规律,甚至距离非常相近的像素出现了移动 趋势相反的现象。一方面原因可能是虽然像素在图像上虽然距离很接近,然而 实际距离可能相差较大,使得两个点处于不同的建筑上,还有一个可能的重要 的原因就是误差,相比于后者而言,我们可见用相干值来估计得到的 PS 点是很 不可靠的。对于后者的情况,分布略微规则一些,除了很少出现临近像素反方 向移动的趋势外,速度大小可以看出一些规律。在图像左部,也就是实际的西 部地区,特别是左上总体上表现出较小的移动速度,而对应于东部地区,总体 上移动速度则偏大一些,这和北京地区的实际变化规律基本上吻合。

关于误差,我们认为可能的误差来源主要有:

① PS 点选择上的误差。特别是对于相干值检测的结果,此误差表现得更为显著。对于幅度值检测的结果,产生这一误差的主要原因就是图像数目的不足,导致了幅度值的统计特性较相位的统计特性相差较大的结果。

② 模型近似上的误差。我们在计算中使用的是线性速度模型,然而实际上, 地表变化的复杂性使得线性模型很难描述我们所要解决的问题,为了得到更好 的结果,我们需要用一个更接近实际情况的地表变化模型来描述我们的问题, 这将是我们以后的工作。此外,线性的大气相位模型也很大程度地受着空间的 限制,在实验区域较大时,这种模型会表现出很大的问题甚至失效。

③ 参数估计上的误差。这些误差包括轨道参数,以及估计出的基线等,这

些估计的误差都会直接或间接地影响着结果。

④ 算法上的误差。以 DEM 数据为例,我们的前提是 DEM 数据为无偏估计, 也就是平均误差为零。对于实际情况,很右可能出现 DEM 数据为有偏估计的情况。在这种情况下,我们就需要通过先验知识来估计 DEM 的平均误差,再把结 果应用到我们的算法中去。

综上所述,为了得到更高的实验结果,我们尽可能获得更多的图像,并且 使用更接近实际的速度模型。另外 ERS 与 ENVISAT 的结合也是 PS 技术发展的 主要趋势之一,我们将在下一章中对其做简单的介绍。

第四章 ERS-ENVISAT 交叉干涉技术

本章主要讨论 ERS-ENVISAT 交叉干涉的一些相关处理技术。在第一节,我 们比较了 ERS 与 ENVISAT 数据之间的差异,并且指出了干涉中存在的主要问 题。第二节,本文重点分析了交叉干涉中的两个问题:配准和相位偏移问题。 在这以小节中本文提出了适用于交叉干涉的利用多个轨道数据的配准方法。在 最后一小节,本文对 ERS-ENVISAT 图像序列中的永久散射体做了初步的分析。

4.1 概述

从前面的章节中我们可以看到, 欧空局的 ERS 系列数据给我们的干涉处理 带来了很好的实验材料。然而不幸的是, 自从 2001 年 6 月以来, ERS-2 数据开 始工作于 ZGM(Zero Gyro Mode)模式[52]。在这种模式下, 对卫星高度的控制大 大减少, 从而导致不同时间获取的 ERS-2 数据之间多普勒质心差距很大。根据 干涉处理的理论, 多普勒质心的差异导致频谱的偏移, 从而导致去相干; 在多 普勒质心差大于方位向带宽时, 两幅图像完全不相干, 无法生成干涉图。因此, 2001 年 6 月以后的 ERS 数据不再适合于我们一般的干涉处理, 我们应该寻找更 合适的实验数据。

作为 ERS 卫星的继承者, ENVISAT 卫星自从 2002 年 3 月 1 日被发射开始 登上了历史的舞台。ENVISAT 卫星上装有先进的合成孔径雷达 ASAR(Advance Synthetic Aperture Radar),与传统的 SAR 相比,它有着自身的技术优势: ASAR 为多视角,这为异轨立体像对的获得提供了前提;ASAR 极化方式有 2 种,这 2 种方式在双极化模式下可以同时工作,而 ERS 是单极化的。由此可见,ENVISAT 卫星数据在保留了原来的 ERS 卫星的一些特性上,还增加了一些更先进的特性, 我们可以选择 ENVISAT 数据作为实验对象,根据 SAR 的干涉理论进行干涉处 理。

然而在一些情况下,我们需要考虑 ERS 与 ENVISAT 的交叉干涉处理。比如说,为了研究某一区域的长期变化情况,我们可以选择 2001 年 6 月前的 ERS

数据和以后的 ENVISAT 数据,从而要考虑主、辅图像分别是 ERS 和 ENVISAT 的情况。一方面,ERS 与 ENVISAT 的交叉干涉是可行的,德国的 DLR 实验室 生成的第一幅 ERS-ENVISAT 交叉干涉图已经证明了这一点[53];另一方面,由于 ERS 与 ENVISAT 数据自身的参数有这一系列的差异,给干涉处理带来了一定的困难。为了进行 ERS 与 ENVISAT 间的交叉干涉,我们必须考虑一些具体问题,包括图像对的选择,干涉处理的具体步骤等问题。

在进行 ERS-ENVISAT 的交叉干涉之前,我们必须首先研究一下它们主要参数之间的区别,表 4.1 列出了 ERS 和 ENVISAT 的一些与干涉处理相关的主要参数。

	ERS	ENVISAT
中心频率(GHz)	5.3	5.331
入射角(°)	约 23	可变
方位向分辨率(m)	3.979	4.045
距离向分辨率(m)	7.904	7.804
方位向带宽(Hz)	1378	1316
距离向带宽(MHz)	15.55	16

表 4.1: ERS 和 ENVISAT 的主要参数对照

从表 4.1 种我们可以看到,首先 ERS 与 ENVISAT 的中心频率存在一定差异。 理论上我们知道,中心频率的差异导致两幅图像的频谱主有部分重叠,从而导 致去相干。为了解决这一问题,我们可以考虑采用合适的基线。在第二章中我 们已经说明,基线的存在导致主辅图像间的频谱偏移,因此我们可以利用基线 导致的频谱偏移来补偿 ERS 与 ENVISAT 中心频率间的实际差异。对于给定的 基线 *B*_a,由基线导致的频谱中心偏移可以表示为:

$$\Delta f_{B_n} = -\frac{f_0 B_n}{R \tan(\theta - \alpha)} \tag{4.1.1}$$

在主、辅图像中心频率实际偏移 Δf 的情况下,我们希望 $\Delta f_{B_n} = -\Delta f$,则可

得出理论上的基线值为:

$$B_n = \Delta f \, \frac{R \tan(\theta - \alpha)}{f_0} \tag{4.1.2}$$

式(4.1.2)给出了最适合 ERS 与 ENVISAT 交叉干涉的理论基线值,这个数值 大概为 2300m。对于 ERS-ERS 干涉的情况,这个数值已经远远超过了两幅图像 相干所允许的范围。而对于 ERS-ENVISAT 干涉情况,这个数值恰恰是相干性的 最佳选择。另一方面,大的基线也能带来足够高的处理精度,恰能满足干涉处 理的需要。

根据 SAR 干涉处理的理论,由相位差 2π 引起的高度差,也就是高度模糊数 可以表示为:

$$\Delta h_{2\pi} = \frac{\lambda R \sin(\theta - \alpha)}{2B_n} \tag{4.1.3}$$

在由(4.1.2)式给定的基线下,一般这个数值约为4m左右,在干涉图上,则 表现为干涉条纹非常的密。在这种情况下,噪声对干涉图的影响很大,为了得 到高质量的干涉图,应该考虑选择受噪声影响小的图像进行干涉。

另外,由于频率的差异将导致相位偏移现象,我们将在下一节中详细说明。

从表 4.1 中我们还可以看到,ERS 与 ENVISAT 数据在分辨率上有所差别,但 是并不显著,因此我们要考虑采取适当的处理方式,对 ERS 与 ENVISAT 数据进 行准确的配准。

综上所述,区别于传统的 ERS-ERS 干涉处理,为了生成 ERS-ENVISAT 图像,我们必须考虑以下几点:

i. 对相位进行补偿;

ii. 采用合适的方法调整图像像素的大小,使得主、辅图像具有相同的分辨率;

iii. 选择基线尽可能接近理论值 2300m 左右;

在具体处理时我们作如下考虑:

① 在配准这一步中区别于传统配准方法,以适合 ERS-ENVISAT 干涉处理

的需要;

② 在干涉图的生成以及相干性计算过程中,去掉相位偏移。

本章主要讨论在生成干涉图过程中的一些具体细节问题,包括交叉干涉图 的配准,以及相位偏移现象等。

4.2 ERS-ENVISAT 干涉的配准与干涉图生成

4.2.1 基于多轨道数据的配准算法及在交叉干涉中的应用

我们首先回顾一下一般情况下 SAR 干涉处理的配准过程, SAR 干涉图像的 配准要经过如下几步:

(一) 基于轨道数据,估算出主、辅图像的一个初始偏移量。一般选择主图像的中心像素作参考,假定其在图像中的位置为 $P_m(x, y)$,根据轨道参数,它在辅图像上对应的位置为 $P_s(x, y)$,则有 $P_s(x, y) = P_m(x, y) + offset_0$,那么 $offset_0$ 就是估计得出的初始偏移量。

(二) 在主图像上选择一系列点,在辅图像上对相应的点根据估算出的初始偏移量选择搜索窗,按照相关性准则估计出每一个点的偏移量。对于点(x,y),它在主、辅图像中对应的复数值分别为:

$$I_1(x, y) = A_1(x, y)e^{j\phi_1(x, y)}$$
(4.2.1)

$$I_2(x, y) = A_2(x, y)e^{j\phi_2(x, y)}$$
(4.2.2)

如果只考虑幅度值,那么相关值也就是实相关可以表示为:

$$\gamma_1(x, y) = \frac{\left|\sum A_1(x, y)A_2(x, y)\right|}{\sqrt{\sum A_1^2(x, y)}\sqrt{\sum A_2^2(x, y)}}$$
(4.2.3)

而如果同时考虑幅度值和相位值,则复相关可以表示为:

$$\gamma_{2}(x, y) = \frac{\left|\sum A_{1}(x, y)A_{2}(x, y)e^{j\phi_{1}(x, y) - j\phi_{2}(x, y)}\right|}{\sqrt{\sum A_{1}^{2}(x, y)}\sqrt{\sum A_{2}^{2}(x, y)}}$$
(4.2.4)

图像的偏移量可以表示为: $offset(x, y) = offset_0 + \Delta offset(x, y)$ 。按照"一致 性测试",选定某个点 (x_0, y_0) ,最后我们得到粗配准这一步的偏移量可以表示为 $offset = offset(x_0, y_0) = offset_0 + \Delta offset(x_0, y_0)$;

(三) 在主图像上选择更多的点,利用步骤□中得到的偏移量对每一点进行亚像素级的偏移量估计,这一步要用到过采样。与上一步不同的事,这一步要选择一系列相干值高的点做控制点,估算出主辅图像的变换关系式,该关系式一般为 N 次多项式。假定主图像上一点为(x,y),对应辅图像上的点(X,Y),则变换关系式可以表示为:

$$X = \sum_{m+n \le N} a_{m,n} x^m y^n$$
 (4.2.5)

$$Y = \sum_{m+n \le N} b_{m,n} x^m y^n$$
 (4.2.6)

对于 ERS-ERS 干涉情况, 主、辅图像分辨率相同。虽然入射角的细微差别 导致在投影到地距时分辨率略有差别,但总体上看差别并不显著,用以上步骤 进行配准可以符合干涉处理的要求。对于 ERS-ENVISAT 干涉的情况,虽然它们 的分辨率差距并不显著,但是在不同像素之间的位置相差悬殊时,他们的偏移 量则相差很大。以方位向为例,它们之间分辨率相差 0.07m,约为方位向分辨率 的1/60,因此就单个像素来讲,它们之间差距不大,但如果两个像素的方位向 位置相差上千,则它们在这个方向上的两个相应的偏移量则可能相差几十个像 素。如果继续使用传统的配准方法,则步骤(三)就会失败,因为主图像的很多像 素难以在辅图像的搜索窗中找到与之相匹配的像素。因此,要实现 ERS-ENVISAT 数据之间的配准,必须对传统方法进行改进,以保证干涉处理的顺利进行。

为此,我们提出了基于多个轨道数据的配准方法。我们的考虑是,既然对 单个像素利用轨道数据估算出来的初始偏移量不能满足配准的要求,我们可以 在步骤(一中对多个像素利用轨道数据。也就是说,在选定一系列点的基础上, 对每一个点都利用轨道数据,得到这些点的初始偏移量;进一步利用粗配准对 这些不同的偏移量进行修正。再进一步进行精配准,估算到亚像素级的偏移量, 并且求出主辅图像间的变换关系式。

为了便于算法实现,节省处理时间,我们还可以考虑简化上述处理步骤。

在对每一个点利用轨道数据算出初始偏移量后,我们可以跳过粗配准这一步而 直接进行精配准。特别是在已知精确轨道数据的情况下,利用轨道数据估计得 到的偏移量误差很小,在几个像素以内。因此,我们的方法可以概括如下:

① 在主图像规则的取样网格上选定主图像上的一系列点,对给定的每一个 点,利用已获得的精确轨道数据估算出辅图像上的相应点,并且求出相应的初 始偏移量,区别于传统方法,此时的偏移量是行和列的函数,也就是有 $P_s(x,y) = P_m(x,y) + offset(x,y);$

② 利用①中选定的每一个点 *P_m(x, y)* 和得到的相应初始偏移量 offset(x, y), 在辅图像上选择匹配窗根据相关值进行亚像素级的精配准,进一步在已经选定 的所有点中选出一系列相关值大于某一阈值点作为控制点,根据算得的精确偏 移量,估算出式(4.2.5)、(4.2.6)形式的变换关系式。

为了提高配准精度,我们做了进一步的处理。在经过了①、②两个步骤后, 接下来要根据变换关系式对辅图像进行重采样处理。我们考虑把重采样后的辅 图像作为一个新的辅图像重新与主图像进行配准,进而重采样,生成干涉图。 在经过第一次重采样之后,辅图像在两个方向上的分辨率已经基本上与主图像 相同,因此在进行第二次配准时,可以按照传统的配准方法进行。另一方面, 在第一次配准之后,主、辅图像的像素已经基本上一一对应,因而可以不必使 用轨道数据,也就是说传统配准方法中的步骤()可以省略掉,此外,传统配准 方法中的步骤()亦可省略。

综上所述,本节所介绍的配准方法可以表示为图 4.1:



图 4.1: ERS-ENVISAT 交叉干涉的主要处理过程

图 4.1 仅给出了 ERS-ENVISAT 交叉干涉的主要过程。为了获得更高的精度,

第四章 ERS-ENVISAT 交叉干涉技术

还可以进行滤波处理,有关这方面的内容可参阅本文第二章。

4.2.2 交叉干涉中的相位偏移现象及去除

从谱分析的角度考虑, ERS 与 ENVISAT 的频率差导致了主辅图像的接收信 号处于不同的频率范围内,从而直接导致去相干。从相位的角度来考虑,它们 之间的频率差将在干涉相位中引入新的一项,也就是说导致了干涉相位的偏移。 本小节主要从理论上分析这一现象,并且给出了相位偏移的一般表示,最后作 为一个实例,给出了它对 ERS-ENVISAT 交叉干涉中的 PS 处理带来的影响。

众所周知,对于主、辅图像频率相同的情况,干涉相位可以表示为:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) = \frac{4\pi f}{c} (R_1 - R_2)$$
(4.2.7)

其中R₁,R₂分别表示主、辅图像的距离。

而对于交叉干涉的情况,主、辅图像的波长或者频率不同,此时干涉相位应该表示为:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda_1} R_1 - \frac{4\pi}{\lambda_2} R_2 = \frac{4\pi}{c} (f_1 R_1 - f_2 R_2)$$
(4.2.8)

上式中 λ_1 , λ_2 分别表示主、辅图像的波长, 而 f_1 , f_2 则表示对应频率。 令 $\Delta f = f_2 - f_1$, 我们对(4.2.8)略作变形, 可以得到:

$$\phi = \frac{4\pi}{c} f_2(R_1 - R_2) - \frac{4\pi}{c} \Delta f R_1$$
(4.2.9)

观察式(4.2.9)我们可以看到,此时的干涉相位分为两部分,第一部分可以看 作是在主、辅图像频率相同的情况下产生的相位,而第二部分则是由频率差带 来的相位偏移,也就是说,相位偏移可以表示为:

$$\phi_{shift} = -\frac{4\pi}{c} \Delta f R_1 \tag{4.2.10}$$

根据式(4.2.10),相位偏移与主图像到雷达传感器的距离有关,因此只需求得距离 *R*₁。便可估算除相位偏移。

在干涉处理过程中,我们仍然假定主图像 $I_1(x,y) = A_1(x,y)e^{j\phi_1(x,y)}$,辅图像 $I_2(x,y) = A_2(x,y)e^{j\phi_2(x,y)}$,为去除相位偏移带来的影响,我们需要考虑以下几个 方面:

(1)

干涉复图像。此时的干涉复图像应该表示为:
$$I(x, y) = I_1(x, y) \cdot I_2^*(x, y) e^{-j\phi_{shift}(x, y)}$$
 (4)

$$= A_{1}(x, y) A_{2}(x, y) e^{j(\phi_{1}(x, y) - \phi_{2}(x, y) - \phi_{shift}(x, y))}$$

$$(4.2.11)$$

我们可以看到相位偏移对干涉幅度图没有影响,而对干涉相位图产生了一 定的影响。

② 相干图。在主、辅图像频率相同的情况下相干图可以用式(4.2.4)表示的 复相关值来计算,而在产生相位偏移的情况下,式(4.2.4)应该变化为:

$$\gamma(x, y) = \frac{\left|\sum A_1(x, y)A_2(x, y)e^{j(\phi_1(x, y) - \phi_2(x, y) - \phi_{shift}(x, y))}\right|}{\sqrt{\sum A_1^2(x, y)}\sqrt{\sum A_2^2(x, y)}}$$
(4.2.12)

③ 配准。在配准过程中,如果计算相关值采用的是复相关,也就是相关值 由(4.2.4)给出,则此时的相关值应该用式(4.2.12)来计算。

为了说明相位偏移给干涉相位带来的影响,我们考虑主图像上不同的两点, 它们到雷达传感器的距离分别是 R_1 和 R_1 + ΔR ,则根据式(4.2.10),由频率差给两 点带来的相位差是:

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{c} \Delta f \Delta R \tag{4.2.13}$$

对于实际情况 $\Delta f \approx 3.1 \times 10^7 H_z$, $c \approx 3 \times 10^8 m/s$,则在 $\Delta R \approx 5m$ 时,就可以产 生 2π 的相位差。而距离向分辨率在 8m 左右,也就是说在一个分辨率单元内就 可以产生大于 2π 的相位差,可见频率差带来的相位偏移对干涉相位的影响非常 之大。

4.2.3 实验结果及分析

第一个问题是图像的选择。选择的两幅图像的基线值应该尽可能靠近本章 第一小节中的理论值 2300m。在我们所获取的图像中,我们选择了最为靠近理 论值的一组数据。主图像为 ERS2 图像,获取日期为 1996 年 8 月 28 日;辅图像 为 ENVISAT 图像,获取日期为 2004 年 3 月 24 日。根据轨道参数估计得两幅图 像的垂直基线为1642.5m,最大限度地抵消了频率差带来的去相干。从时间上看, 两幅图像的时间差比较大,因此仍然有较大的时间去相干。

为了便于处理,我们选择北京城区的一小块区域,图像大小为5000×1000。 首先试图使用传统的配准方法生成干涉图,我们使用开放源代码软件 Doris[20,21] 作为工具。在进行了粗配准与精配准以后,得到的相干之非常低,精配准时选 择 600 个点,选择控制点时,取相干阈值 0.2,则在这 600 个点中只有大约 10 个点可以被选做控制点。图 4.2 列出了选取的控制点相关的信息,它截取自处理 结果的一部分,反映了精配准的结果,以及配准后相干性的大小。

win	posL	posP	offL	offP	corr	eL	eP	wtstL	wtstP
8	16264	3279	-610.06	413.06	0.22	-0.12	-0.08	0.96	1.01
9	16264	3365	-610.06	413.31	0.22	0.06	0.10	0.44	1.18
49	16613	3183	-614.06	413.12	0.26	0.01	-0.01	0.10	0.16
51	16613	3356	-614.88	413.38	0.32	0.07	0.00	0.77	0.04
71	16787	3265	-616.81	413.12	0.25	0.07	-0.07	0.61	0.98
73	16787	3438	-616.75	414.06	0.22	-0.11	-0.01	1.27	0.24
79	16874	3045	-614.94	413.31	0.27	0.08	-0.03	1.44	0.70
80	16874	3132	-616.75	413.25	0.23	-0.19	0.13	1.35	1.45
403	19577	2844	-614.75	414.50	0.30	-0.00	-0.00	0.62	1.09
448	19926	3095	-616.38	418.75	0.24	0.01	0.00	0.83	1.05

图 4.2: 利用传统配准方法选得的控制点

win	posL	posP	offL	offP	corr	eL	eP	wtstL	wtstP
20	16352	3404	-610.50	414.19	0.46	-0.30	0.09	2.12	0.95
24	16440	2842	-611.69	409.25	0.49	-0.04	0.03	0.27	0.29
46	16615	2924	-614.62	410.19	0.45	-0.07	0.29	0.39	2.54
74	16878	2615	-618.62	407.25	0.62	0.18	-0.08	1.53	1.04
218	18019	3232	-637.69	412.38	0.72	-0.04	-0.10	0.38	1.45
239	18195	3227	-640.69	412.38	0.55	-0.15	-0.05	1.04	0.55
270	18458	3177	-644.62	412.19	0.44	0.25	0.20	1.38	1.67
274	18546	2615	-646.25	407.31	0.43	0.04	0.03	0.20	0.24
353	19160	3073	-656.56	411.25	0.64	-0.15	0.17	1.20	2.11
358	19248	2596	-657.69	407.19	0.52	0.14	0.07	0.97	0.72
360	19248	2769	-657.69	408.38	0.54	0.17	-0.15	1.19	1.51
368	19248	3458	-657.75	414.44	0.48	-0.03	-0.01	0.20	0.07
549	20828	2728	-683.69	408.19	0.56	0.10	-0.01	0.76	0.15
569	21003	2637	-686.62	407.25	0.45	0.03	-0.22	0.19	2.07
577	21003	3326	-686.50	413.25	0.41	0.00	-0.01	0.01	0.11
591	21179	2719	-689.56	408.19	0.44	-0.02	0.05	0.12	0.47

图 4.3: 利用本节配准方法选得的部分控制点

干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用

我们在 Doris 源代码的基础上进行修改,实现了本小节所提出的配准算法。 利用我们的算法,精配准后的相干值得到了大幅度提高。这次我们选择控制点 的阈值为 0.4,而选出的控制点个数反而增加到 60 多个,图 4.3 列出了选得的部 分控制点及相关信息。

我们从另外一个角度来考虑,观察 4.2 和 4.3 中的偏移量,4.3 中方位向偏 移量从-610.5 到-689.56,不同的方位向位置偏移量差距很大,这对于主辅图像分 辨率有所差别的情况来说是合理的。而图 4.2 方位向偏移量差距并不显著,显然 是不合理的。

在利用本节提出的方法进行第一次配准和重采样之后,我们把重采样之后 的辅图像作为新的辅图像,进行第二次配准和重采样,最后生成干涉图。为了 突出比较,我们同时生成了使用传统配准方法、用本节配准方法而没有去掉相 位偏移和用本节配准方法并且去掉相位偏移三种不同情况下的干涉图,图4.4比 较了这三种不同情况下的干涉幅度图和相位图。其中多视化处理的系数为10x2。 所谓多视化处理,就是将原来图像中的多个行或列在最后的输出图像中压缩成 一行或列,以达到较好的视觉效果。

比较图 4.4 在不同情况下生成的幅度图,我们很明显可以看到,使用传统方法生成的结果配准误差偏大,表现为幅度图线条较为模糊,并且线条较使用本节方法所获得的结果宽一些。而去掉相位偏移和步去掉相位偏移时的幅度图没有区别,原因是相位偏移只作用在干涉相位上。然而从干涉图上,我们仍然看不到干涉条纹。我们可以从另一个角度来验证结果的进步性,也就是从相干图来出发,最后我们分析干涉图质量不够好的可能原因。图 4.5 给出了这三种不同情况下的相干图及直方图。

第四章 ERS-ENVISAT 交叉干涉技术



图 4.4: 三种不同情况下生成的干涉幅度图和相位图, 左为干涉幅度图, 右为 干涉相位图, 多视处理系数为 10x2, 上: 用传统方法配准生成的结果; 中: 使 用本节的配准方法, 没有去掉相位偏移生成的结果; 下: 使用本节的方法, 并 且去掉相位偏移生成的结果

干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用



图 4.5: 在三种不同情况下生成的相干图及直方图, 左为相干图, 多视处理系数为 10x2, 右为直方图, 上: 用传统配准方法生成的结果; 中: 用本节提出的配准方法, 没有去掉相位偏移生成的结果; 下: 用本节提出的方法, 去掉相位偏移生成的结果。

第四章 ERS-ENVISAT 交叉干涉技术

观察图 4.5,在适用本节提出的配准方法后,相干图亮度值有所提高,说明 了相干值总体上的提高。从直方图上看,图 4.5 中由上至下相比较整体上都有一 个向右的偏移,相干性在总体上都有所提高。也就是说,本节提出的方法在相 干性上优于传统方法,而去掉相位偏移后的相干性又优于去掉相位偏移以前的 结果。

从干涉图上看,我们最后生成的干涉图仍然看不到明显的干涉条纹。我们 认为,其中可能的原因有:

第一,在配准的过程中,我们使用的相关性准则是实相关,也就是只考虑 到了复图像的幅度值。理论上讲,这样的结果会导致较大的误差[54]。为了减小 误差,我们应该考虑使用复相关的方法,并且在计算相关值的过程中去掉相位 偏移。

第二,干涉图像的基线很大,从而干涉图像的高度模糊数很小,噪声对干涉结果的影响比较大;

第三,理论上的最佳基线为 2300*m*,而我们采用的图像基线为 1642.5*m*,相 当于主辅图像频率相同时基线在 650*m* 左右,根据我们以往处理结果,这在 ERS-ERS 干涉的情况下,也不容易看到干涉条纹,因此这一结果应该在预料之 中;

第四,地形坡度角对基线去相干有这一定的补偿作用,可以考虑选择合适 的区域以保证合适的地形坡度角,但是由于地形的复杂性,这一点有很大的不 确定性;

最后,时间去相干对结果也有一定的影响,但这一影响并不是主要因素。

4.3 ERS-ENVISAT 中的永久散射体初步研究

在 PS 处理过程中,需要用到大量的图像数据,而 ERS 与 ENVISAT 的结合 使用则大大增加了可用的图像数量。另一方面,ERS 与 ENVISAT 自身参数方面 的差异给它们之间的 PS 处理带来了一系列的问题。我们在研究 ERS 与 ENVISAT 图像序列中的 PS 问题时,除了考虑上一章中的问题外,还必须考虑特定的问题 和方法。目前为止,主要有两种思路来研究 ERS-ENVISAT 中的 PS:一是以一

干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用

幅图像做主图像,比如某一幅 ERS 图像,同时生成 ERS-ERS 干涉图和 ERS-ENVISAT 干涉图; 二是选择一幅 ERS 图像做主图像,只生成 ERS-ERS 干 涉图,同时选择一幅 ENVISAT 图像做主图像,生成 ENVISAT-ENVISAT 干涉图,从而得到两组干涉序列,最后利用两组干涉图的对应关系来研究永久散射体的 连续性现象等问题。本节仅在理论上分别对两种思路做简单分析,重点在于说 明 ERS-ENVISAT 之间的结合带来的一系列问题。

4.3.1 ERS-ENVISAT 交叉干涉在永久散射体研究中的应用

这种情况对应于第一种思路,也就是对所有图像使用同一幅主图像。使用 ERS-ENVISAT 交叉干涉的好处主要有二:

① 使得长时间获取的数据之间的干涉成为可能。比如,我们所用的 ERS 数据最早为 1995 年,最晚为 2002 年,而 ENVISAT 数据则最晚为 2005 年,那么我们可以利用 ERS-ENVISAT 交叉干涉来获得更长的时间基线。这种情况在地表移动速度很小时,可以起到较好的效果。

② 通过研究与距离向相关相位偏移,可以确定 PS 点在分辨率单元内的准确位置。为了研究 PS 点在分辨率单元内的斜距位置对干涉相位的各个成分的影响,我们现对式(4.2.9)做进一步推导。

根据第二章的基本理论,我们可以知道对应于主、辅图像频率相同时,干涉相位可以分成平地相位和地形相位两部分。也就是说,对于式(4.2.9)中右边的第一项,它可以重新写为:

$$\frac{4\pi}{c}f_2(R_1 - R_2) = \frac{4\pi}{c}(\eta \frac{f_2 B_n}{R_1 \tan \theta} + q \frac{f_2 B_n}{R_1 \sin \theta})$$
(4.3.1)

其中η表示斜距向位置, q表示地形高度。于是式(4.2.9)可以写作:

$$\phi = \frac{4\pi}{c} \left(\eta \frac{f_2 B_n}{R_1 \tan \theta} + q \frac{f_2 B_n}{R_1 \sin \theta} + \Delta f R_1 \right)$$
(4.3.2)

现在我们考虑分辨率单元内与中心斜距向距离为 Δr 的一点,它的干涉相位为 $\phi + \Delta \phi$,与主图像的距离为 $R_1 + \Delta r$,高度为 $q + \Delta q$,我们有:

$$\phi + \Delta \phi = \frac{4\pi}{c} ((\eta + \Delta r)) \frac{f_2 B_n}{(R_1 + \Delta r) \tan \theta}$$

$$+ (q + \Delta q) \frac{f_2 B_n}{(R_1 + \Delta r) \sin \theta} + (\Delta f R_1 + \Delta r))$$
(4.3.3)

进一步考虑到
$$\Delta r \ll R_1$$
, $\frac{R_1}{R_1 + \Delta r} \rightarrow 1$, 式(4.3.3)可以简化为:

$$\phi + \Delta\phi = \frac{4\pi}{c} \left((\eta + \Delta r) \frac{f_2 B_n}{R_1 \tan \theta} + (q + \Delta q) \frac{f_2 B_n}{R_1 \sin \theta} + \Delta f(R_1 + \Delta r) \right) \quad (4.3.4)$$

比较式(4.3.2)和(4.3.4)我们可以得到:

$$\Delta \phi = \frac{4\pi}{c} \left(\Delta r \Delta f + \Delta r \frac{f_2 B_n}{R_1 \tan \theta} + \Delta q \frac{f_2 B_n}{R_1 \sin \theta} \right)$$
(4.3.5)

式(4.3.5)最终给出了与斜距向位值相关的相位偏移的具体表示,右边括号中的三项分别表示由位置偏移和频率差引起的相位偏移,仅由位置偏移引起的相位偏移和仅由高度差引起的相位偏移。我们也可以对(4.3.5)略作变形。两个不同的频率 *f*₁, *f*₂之间的关系可以表示为:

$$f_2 = f_1 (1 + \frac{\Delta f}{f_1}) \tag{4.3.6}$$

那么式(4.2.17)右边括号中的后两项可以表示为:

$$\Delta r \frac{f_2 B_n}{R_1 \tan \theta} + \Delta q \frac{f_2 B_n}{R_1 \sin \theta} = \Delta r \frac{f_1 B_n}{R_1 \tan \theta} + \Delta r \frac{f_1 B_n}{R_1 \tan \theta} \frac{\Delta f}{f_1} + \Delta q \frac{f_1 B_n}{R_1 \sin \theta} + \Delta q \frac{f_1 B_n}{R_1 \sin \theta} \frac{\Delta f}{f_1}$$

$$(4.3.7)$$

对于 ERS-ENVISAT 干涉的具体情况, $\Delta f \ll f_1$, 从而 $\Delta r \frac{f_1 B_n}{R_1 \tan \theta} \frac{\Delta f}{f_1} \ll \Delta r \frac{f_1 B_n}{R_1 \tan \theta}, \Delta q \frac{f_1 B_n}{R_1 \sin \theta} \frac{\Delta f}{f_1} \ll \Delta q \frac{f_1 B_n}{R_1 \sin \theta},$ 因而式(4.3.5)也可以写

为:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{c} (\Delta r \Delta f + \Delta r \frac{f_1 B_n}{R_1 \tan \theta} + \Delta q \frac{f_1 B_n}{R_1 \sin \theta})$$
(4.3.8)

式(4.3.5)与式(4.3.8)说明,在计算相位偏移 Δ φ 时,可以用主图像的频率,也可以用辅图像的频率,为方便起见,以后我们以式(4.3.8)为准。

现在我们分析式(4.3.8)中右边各项对相位偏移贡献的大小。对于 ERS-ERS 情况, $\Delta f = 0$, 只有右边的后两项起作用, $f_1 = 5.3 \times 10^9 Hz$, $c \approx 3 \times 10^8 m$, $R_1 \approx 8 \times 10^5 m$, $\theta \approx 23^\circ$, B_n 一般小于 1000m, 估算的结果表明在分辨率单元内的位置偏移对相位产生的偏移不大,因此, ERS-ERS 干涉的情况可以不考虑 PS 在分辨率单元的具体位置。

对于 ERS-ENVISAT 干涉的情况,前边小节中已经计算过,式(4.3.8)中右边 第一项产生的相位偏移式很大的。因此,在 PS 的处理中,我们必须考虑由式(4.3.8) 中右边第一项带来的相位差,也就是必须考虑 PS 点在分辨率单元内的具体位置。 (4.3.8)中右边第一项所表示的相位在 PS 处理中也叫做位置相位(LPS, Location Phase Screen),它取决于 PS 点相对于分辨率单元中心的位置,对于同一图像上 的不同 PS 点,它们的 LPS 是不同的,而对于不同干涉图中的同一 PS 点,它们 的 LPS 应该是相同的,因为它们有相同的相对于分辨率单元中心的位置。 C.Colesanti 用实验的方法证明了这以相位偏移的存在[55]。他给出的相位偏移表 达式与式(4.3.8)相同,并且指出: PS 位置的精度应该达到 1*m* 以内。

与 PS 点的距离向偏移类似的是,相对于分辨率单元中心的方位向位置偏移 也会带来相位偏移,这个相位偏移与主辅图像的多普勒质心差有关[56]:

$$\Delta \phi_{A_{zi}} \approx 2\pi \frac{\Delta f_{DC}}{PRF} \frac{\Delta x}{\delta_{A_{zi}}}$$
(4.3.9)

上式中 $\Delta \phi_{Azi}$ 表示方位向相位偏移, Δf_{DC} 表示多普勒质心差, Δx 表示相对于 分辨率中心的方位向偏移, δ_{Azi} 表示方位向分辨率。式(4.3.9)说明,方位向位置 偏移产生的相位偏移除了与方位向相对位置相关外,还和具体的主辅图像相关, 这和有距离向位置偏移而产生的 LPS 是有所不同的。

式(4.3.9)的意义在于更大范围内使用 ERS 图像。在 2000 年 6 月以前, ERS 工作于 3 Gyro Mode(3GM),不同的 ERS 图像之间多普勒质心差距不大,因而式 (4.3.9)的意义不大。而在此之后, ERS-2 工作于 Mono-Gyro Mode(MGM)和 Zero Gyro Mode(ZGM),此时多普勒质心差距很大,因而根据式(4.3.9),必须考虑 PS 点在分辨率单元内的相对方位向位置。

4.3.2 基于两组干涉序列的永久散射体连续性研究

这种方法需要对 ERS-ERS 和 ENVISAT-ENVISAT 两个干涉序列分别进行处理,而研究 ERS 与 ENVISAT 中的永久散射体连续性现象,具有非常重要的意义。

永久散射体的连续性的一个简单的解释就是 ERS 序列中的 PS 点是否在 ENVISAT 序列中仍为 PS 点。N.Adam 定量地给出了它们的永久散射体连续性的 研究方法[57],现在我们做简单的介绍。

用相位偏差 ϕ_{err} 来作为 PS 点的选择标准,只有在 ϕ_{err} 小于某一阈值的条件下 才可以被选做 PS 点。以幅度值的方法为例,在第三章的讨论中我们已经得出 $\phi_{err} \approx D_A$ 。对于 ERS 中的 PS 点,它们的相位偏差为 ϕ_{err}^{ERS} ,在 ENVISAT 序列中, 它们对应的相位偏差为 $\phi_{err}^{ENVISAT}$,现在只需比较它们之间的相位偏差大小,如果 有:

$$\phi_{err}^{ENVISAT} \le \phi_{err}^{ERS} \tag{4.3.10}$$

则我们认为该点在 ENVISAT 序列中仍为 PS 点。

N.Adam 的实验结果表明,80%以上的 ERS 中的 PS 点能够保持连续,也就 是满足式(4.3.10)。在理论上,相位偏差和干涉图像的多普勒质心差有关系。在 ERS 图像中,如果存在不同的工作模式。比如 3GM 和 ZGM,则相应的多普勒 质心差会很大,从而产生较大的相位偏差,用 ϕ_{err} ,来表示平均相位偏差,在理 论上有:

$$\overline{\phi_{err}^{ENVISAT}} \le \overline{\phi_{err}^{ERS}}$$
(4.3.11)

式(4.3.11)和 N.Adam 的实验结果相吻合。

在处理过程中,关键问题是如何寻求 ERS 与 ENVISAT 图像中像素的对应 关系,我们可以考虑 ERS-ENVISAT 图像的配准方法,具体可参阅本章第二节。

关于 ERS 中的 PS 在 ENVISAT 中不再表现为 PS 的原因主要有二:

- 地面反射体随着时间而变化。以城市地区为例,城市的建设有可能使原 来的永久散射体变为非永久散射体。
- 2. 反射体各方向反射特性的不同。虽然反射体在某一方向表现出稳定的反

射特性,因而在 ERS 图像中被认为是 PS。而在 ENVISAT 图像中,由 于入射角发生了变化,图像反映的是不同方向的反射特性,因而有可能 不再是 PS 点。

研究永久散射体连续性的意义还在于它可以决定最终 PS 研究方法的选择。 如果 ERS 中的 PS 在 ENVISAT 图像中的存活率高,也就是表现出很强的连续性, 则适合用交叉干涉的方法进行研究;而如果表现的连续性较差,则适合用两个 独立干涉序列的方法进行研究。关于这方面的问题,N.Adam 在他的文章中也有 所讨论[57]。

第五章 结束语

5.1 工作小结

InSAR 技术诞生至今,在短短的十几年里得到了突飞猛进的发展,并且在 许多方面得到了广泛的应用。特别是在最近几年里,PS 技术的出现以及 ENVISAT 的成功发射,大大丰富了 InSAR 的研究内容,给 InSAR 技术带来了新 的话题。本文从研究 InSAR 的基本理论出发,重点研究当前 InSAR 领域的几个热 门话题及应用。本硕士论文的主要工作和贡献可以概括为如下:

- 回顾了干涉处理的整个过程和差分干涉图的生成,从复图像的配准开始,到 平地效应的去除。我们特别关注图像的滤波问题,并且实现了解决多普勒去 相干的方位像滤波算法。
- 分析并解决了当前永久散射体技术的一些局限性。i)提出了 PS 点选择的改进 算法,该算法基于一个自适应的阈值; ii)指出 PS 模型中的非线性相位方程 中的解存在的问题,并且提出了一个可以获得更稳定的解的改进算法; iii) 将本文提出的算法应用到北京地区的 ERS 数据,并且和其它方法得到的结 果进行了比较。
- 由于单一的传感干器获取的数据在数量上不能满足以我们的处理,我们研究 了交叉干涉的问题,其中的一个特例就是 ERS 和 ENVISAT: i) 详细分析 传感器之间波长的不同对干涉结果带来的影响。特别是它将引入相位的偏 移,从而应该在结果中去除。我们指出了去除这一相位偏移的具体措施; ii) 有效的改进了图像的配准方法,使其适合于图像间的不同分辨率; iii)应用 于北京地区的数据,我们给出并分析了初步的实验结果。

5.2 当前方法的局限性及未来展望

 在研究 PS 的技术过程中,我们一直假定其变化规律为一线性模型。实际上, 地表变化复杂多样,用简单的线性模型来表示是不够的。为了解决这一问题,

干涉雷达中的永久散射体和交叉干涉技术的研究与应用

- 我们可以考虑使用更复杂,更接近实际变化的其它速度模型来代替线性模型,这其中可能需要一些地理知识和针对于实验地区的具体情况。此外,我 们还可以认为速度的非线性部分被包含在我们处理结果的"噪声"里,从而 利用滤波等手段来提取速度的非线性部分。
- 虽然我们已经对 ERS-ENVISAT 的干涉情况做了一些研究,然而得到的干涉 结果并不理想。这其中有图像选择本身的原因,也不能排除我们处理过程中 的原因。在以后的工作中,随着数据获取的不断积累,我们考虑选择更合适 的图像对做实验,进一步分析实验结果和原因,从而完善 ERS-ENVISAT 的 交叉干涉处理技术。

参考文献

[1] A.Ferretti, C.Prati, F.Rocca. Permanent Scatters in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.39, No.1, January 2001

[2] Graham L.C. , Synthetic interferometric radar for topographic mapping, Proc.IEEE, 1974, Vol.63:763~768

[3] Zebker H.A., Golstein R.M., Topographic mapping from interferometric SAR observations, J.Geophys.Res.,91:4993~5001, 1986

[4] Gabriel A.K., Zebker H.A., Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B, Int.J.Remote Sens. 9:857~872, 1988

[5] Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L., Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping, Radio Sci., 23(4):713~720, 1998

[6] Li F.K., Goldstein R.M, Studies of multibaseline spaceborn interferometric synthetic aperture radars, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vo.34, No.1,1990:88~96

[7] Rodriguez.E., Martin.J.M, Theory and design of interferometric synthetic aperture radar. Proc.IEEE, 1992, Vol. 139:147~159

[8] F.Gatelli, Andrea Monti Guarnieri, F.Parizzi, The wavenumber shift in SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No.4, JULY 1994

[9] Colesanti. C., Ferretti, A., Prati.C., Rocca.F, Full exploitation of the ERS archive: Multi data set permanent scatterers analysis, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02

[10] A.Arnaud, N.Adam, R.Hanssen, ASAR ERS interferometric phase continuity, IGARSS 2003, Toulousse (France), 21-25 July, 2003.

[11] Cloude.SR, KP.Papathanassiou, Polarimetric SAR interferometry, IEEE Trans.

[12] Geoscience and Remote Sensing, Vol.35, No.5, Sept.1998:1551~1565

Zekber.H.A., Villasenor.J, Decorrelation in interferometric radar echoes, IEEE Trans. 1992 Geosci. Remote Sensing, Vol.30., No. 5:950-959.

[13] Zekber.H.A., Werner.C.L., Rosen.P.A. et al., Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, IEEE Trans. 1994 Geosci. Remote Sensing, Vol. 32, No. 4:823-836.

[14] Zekber.H.A., Rosen.P.A., Goldstein.R.M., et al., On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake, J, Geophy.,1994, Vol. 99, No. B10:19.617-19.634.

[15] Livingstone.C.E., A.L.Gray, R.K.Hawkins er al., The CCRS Airborne SAR Systems: Radar for Remote Sensing Research, Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 21, No. 4, December 1995:468-490.

[16] S.N.Coulson, SAR Interferometry with ERS 1, Earth Observation Quarterly. no.40. April,1993.

[17] 王风, V.Prinet, 马颂德, 用干涉合成孔径雷达技术获取地表三维信息, 自动化学报 2002, Vol.28, No.4:527~534

[18] Wadge.G., B.Parsons, Achieving the EVINSAR objectives with TerraSAR-L, in Proc. Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, Frascati,Italy,2– 5 December.

[19] The ERDAS Website: http://gis.leica-geosystems.com.

[20] Kampes.B Stefania.U., Doris: The Delft object-oriented Radar Interferometric software. 1999 ITC 2nd ORS symposium, August 1999

[21] Kampes.B, Hanssen.R, Perski.Z., Radar Interferometry with Public Domain Tools. FRINGE 2003, December 1-5, Frascati, Italy

[22] 舒宁, 雷达遥感原理, 北京, 测绘出版社, 1996

[23] 王超,利用航天飞机成像雷达数据提取数学高程模型,遥感学报,1997, Vol.1,No.1: 46~49

[24] Goldstein.R.M, Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry,

Geophys.Res.Lett., 1995,22:2517~2520

[25] Massonnet.D., M.Rossi, C.Carmona, et al., The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 1993,364, 138-142

[26] Zebker.H., P.Rosen, R. Goldstein, et al., On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: the Landers earthquake, J. Geophys. Res., 99, 19617-19634,1994

[27] M. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, et al., Surface displacement of the March 26, 1997, Kagoshima-ken-hokuseibu earthquake in Japan from synthetic aperture radar interferometry, Geophys. Res. Let., Vol.25, No.24, 4541-4544, 1998.

[28] 王超,刘智, 星载合成孔径雷达干涉测量,科学出版社,20-100,2002年 9月第一版

[29] 张景发, 李发祥, 刘钊, 差分 InSAR 处理及应用分析, 地球信息科学, 2000, 2(3): 58~64

[30] F.Gatelli, Andrea Monti Guarnieri, F.Parizzi, The wavenumber shift in SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No.4, JULY 1994

[31] Doris online user manual,

http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/usermanual/node48.html

[32] Curlander.J, Mcdonough.R., Synthetic aperture radar, system and signal processing, John Wiley and sons, 1991

[33] Brown.W.M, Walker model for radar sensing of rigid target fields. IEEE Trans.Aerosp.Electron.Syst,1980, AES-16:104~107

[34] Mensa.D.L., Haleby.S., Wade.G., Coherent Doppler topography for microwave imaging, Proc.IEEE,1983,71:254~261

[35] Wan Der, Kooij.M.W.A., A workstation for spaceborn interferometric SAR data, IGARSS'96

[36] C.Prati, F.Rocca, A.Monti Guarnieri et al., Interferometric techniques and applications, ESA Study Contract Rep., Contract N.3-7439/92/HE-I. Ispra, Italy, 1994

[37] N.Adam, B.Kamps, M.Eineder, The Development of a Scientific Permanent Scatterer System, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2003

[38] http://earth.esrin.esa.it/rootcollection/sysutil/esc_d.html

[39] N.Adam, B.Kamps, M.Eineder, Development of a Scientific Permanent Scatterer System: Modifications for Mixed ERS/ENVISAT Time Series, ERS-ENVISAT Symposium, 2004

[40] CEOS SAR Calibration Workshop, ESTEC, Noordwijk, Netherlands, September 1993.

[41] B.Kamps, N.Adam, Deformation Parameter inversion using Permanent Scatterers in Interferogram Time Series, EUSAR'04, Ulm, Gemrany, pages 341-344, 2004

[42] A.Ferretti, C.Prati, F.Rocca, Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatters in Differential SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, VOL.38, NO.5, Sep. 2000

[43] Oscar Mora, Antoni Broquetas, Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced Set of Interferometric SAR Images, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.41, No.10, October 2003

[44] Bert M.Kampes, Rammon F.Hanssen, Ambiguity Resolution for Permanent Scatter Interferometry", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.42, No.11, November 2004

[45] C.Colesanti, R.Locatelli, F.Noveli, Ground Deformation Monitoring Exploiting SAR Permanent Scatterers, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02.

[46] Colesanti.C, Ferretti.A, Ferrucci.F et al., Monitoring known seismic faults using the permanent scatterers (PS) technique, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000

[47] Ferretti. A, Ferrucci.F, Prati.C et al., SAR analysis of building collapse by means of the permanent scatterers technique, Geoscience and Remote Sensing

Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000

[48] Ferretti.A, Prati.C, Rocca, F, Analysis of Permanent Scatterers in SAR Interferometry Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000

[49] Dehls.J.F, Basilico.M, Colesanti.C, Ground deformation monitoring in the Ranafjord area of Norway by means of the permanent scatterers technique, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02

[50] Colesanti.C, Ferretti.A, Prati.C et al., Full Exploitation of the ERS Archive: Multi Data Set Permanent Scatterers Analysis, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02

[51] Colesanti.C, Ferretti. A, Prati.C et al., Multi-image satellite SAR interferometry: state of the art and future trends, Radar Conference, 2003. Proceedings of the International 3-5 Sept. 2003

[52] Meadows.P.J., The ERS-2 SAR performance: another further update, CEOS SAR Workshop, London, 24-26 September 2002.

[53] A.Arnaud, N.Adam, R.Hanssen, ASAR ERS interferometric phase continuity, IGARSS 2003, Toulousse (France), 21-25 July, 2003.

[54] Zhang Yanjie, Prinet.V, InSAR coherence estimation, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings

[55] C.Colesanti A.Ferretti, ERS-ENVISAT Permanent Scatterers Interferometry, IGARSS ,Toulouse,2003

[56] M.Arrigoni, C.Colesanti, A.Ferretti, Identification of the Location Phase Screan of ERS-ENVISAT Permanent Scatters, Fringe 2003, Frascati, Italy, 1-5 December 2003(ESA SP-550, June 2004)

[57] N.Adam, B.Kamps, M.Eineder, Development of a Scientific Permanent Scatterer System: Modifications for Mixed ERS/ENVISAT Time Series, ERS-ENVISAT Symposium, 2004

[58] Desnos. Y.L, Buck.C, Guijarro.J et al., The ENVISAT advanced synthetic

aperture radar system, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000

[59] Guarnieri.A.M, C.Prati, ERS-ENVISAT Combination for Interferometry and Super-resolution, ERS-ENVISAT Symposium 2000, 16-20 Oct, Gothenburg, Sweden

[60] M. De Stefano, A. Monti Guarnieri, Robust Doppler Centroid Estimate for ERS and ENVISAT, IGARSS '2003 (Tolouse, France) Jul 21–25, 2003

附录一: 主要符号列表

- λ: 雷达信号波长
- R: 雷达传感器与地物间的斜距距离
- B: 基线
- B_n:垂直基线
- B₁:平行基线
- θ: 雷达信号入射角
- a,b:地球椭球长,短半轴

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$
: 地球椭球第一偏心率
 $e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}}$: 地球椭球第二偏心率

- RSR: 距离采样频率
- PRF: 脉冲重复频率

SAT(ERS1/2,ENVISAT)	Orbit	Date	Normal	Temporal	Height
			Baseline(m)	Baseline(day)	Ambiguity(m)
ERS2	17607	19980902	0	0	-
ERS2	03579	19951227	198.6	-980	44.3917
ERS2	06585	19960724	90.8	-770	97.0946
ERS2	07086	19960828	-882.4	-735	-9.9911
ERS2	12096	19970813	-80.9	-385	-108.9764
ERS2	12597	19970917	-786.5	-350	-11.2094
ERS1	32771	19971021	-499.7	-316	-17.6430
ERS2	16104	19980520	93.6	-105	94.19
ERS2	16605	19980624	153.7	-70	57.3597
ERS2	17106	19980729	-245.1	-35	-35.9698
ERS2	18108	19981007	379.8	35	23.2127
ERS2	21615	19990609	52.5	280	167.9274
ERS2	22617	19990818	1044.3	350	8.4422
ERS2	38649	20020911	205	1470	43.0058
ERS2	39150	20021016	-316	1505	-27.8993
ENVISAT	6785	20030618	-426.3	-199.1	*
ENVISAT	8288	20031001	-517	-247.4	
ENVISAT	9290	20031210	-777.1	-386.8	
ENVISAT	9791	20040114	-64.3	-19	
ENVISAT	10793	20040324	758.3	230.1	
ENVISAT	11294	20040428	-555	-183.1	
ENVISAT	13298	20040915	391.1	134.8	
ENVISAT	13799	20041020	346.5	65.4	

附录二:本文使用的数据列表

*:考虑到 ERS 与 ENVISAT 传感器的区别,本文未列出它们之间的高度模糊数。
致 谢

我在攻读硕士期间从事的学习和科研工作,是在导师和实验室各位老师、同 学的指导和帮助下完成的。在完成论文之际,我谨表最诚挚的谢意。

首先感谢我的导师普林特副研究员。在研究生三年的学习和工作中,她给予 了我精心的指导和尽心的关怀。普林特不仅学术精深、工作严谨,而且平易近人、 为人师表。她对我的影响将使我终生受益。

感谢我们组的吴刚,段静辉,任坤,张艳洁,余战武,洪碧珍,刘炜,白笛 暮,张朝晖,彭婷。特别感谢潘春洪副研究员,段静辉和白笛暮,他们为论文工 作提供了许多帮助。感谢中法实验室的腾军,杨余久,陈其兵,刑宏杰,尹巍巍, 陈翀,曲寒冰。

感谢曾琪明副教授、王风副教授、唐明副研究员和王一丁副研究员,感谢他 们为本文提出的宝贵意见。

感谢模式识别国家重点实验室给我提供了良好的学习环境和实验条件。感谢 娄文利老师、连国臻老师,研究生部的李磊、卜树云等老师,为我们的学习生活 提供的帮助。

最后我要感谢我的爸爸、妈妈,感谢他们对我至始至终的支持和鼓励!感谢 我的那些朋友们!

白俊

2005年5月

作者个人简历

白俊,男,汉族,团员,1980年9月1日出生于黑龙江省呼兰县。1998年 9月毕业于黑龙江省呼兰县第一中学,同年9月考入北京清华大学自动化系学习, 并于2002年7月毕业,获工学学士学位。2002年9月至2003年6月,在中国 科学院研究生院学习研究生基础课。2003年8月至2005年6月在中科院自动化 所模式识别实验室攻读硕士学位,主要研究方向为干涉合成孔径雷达。

硕士期间发表的论文:

Bai Jun, Veronique Prinet, 'InSAR PS Adaptive Detection and its Application in Beijing Area', *International Geosciences and Remote Sensing Symposium IGARSS2005, Seoul, Korea.*

Bai Jun, Veronique Prinet, 'PS Technique and its Application in Beijing Area', International ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 2005, Hannover, Germany.