



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

基于分布式目标雷达干涉测量的海塘形变研究

作者姓名: 张云俊

指导教师: 邵芸 研究员

中国科学院遥感与数字地球研究所

学位类别: 理学

学科专业: 地图学与地理信息系统

研究所: 中国科学院遥感与数字地球研究所

2014 年 05 月

Distributed Scatterer Radar Interferometry
for Deformation of Seawalls

By
Yunjun Zhang

A Dissertation Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Master of Science
In Cartography and Geographic Information System

Institute of Remote Sensing and Digital Earth
May, 2014

中国科学院遥感与数字地球研究所

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名:

日期: 年 月 日

学位论文使用授权说明

本人在导师指导下完成的论文，知识产权归属中国科学院遥感与数字地球研究所。

本人完全了解中国科学院遥感与数字地球研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意研究所保存或向国家有关部门及机构送交论文的印刷版和电子版，允许论文被查阅和借阅；同意授权研究所采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存和汇编本学位论文。

本人保证毕业后，以本论文数据和资料发表论文（著作）或使用论文工作成果时，第一署名单位为中国科学院遥感与数字地球研究所，并征得导师同意。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名:

导师签名:

日期: 年 月 日

摘要

海塘是对沿海地区抵御海潮涌浪，防止海岸坍塌，保护城镇、农田、盐场安全的特殊堤防工程；海塘的安全运行，关系着沿海地区人民的生命财产安全和社会的经济稳定。国内的海塘主要分布在江苏、浙江、福建省和上海市；其中，以钱塘江口和杭州湾南北两岸的海塘历史最为悠久。由于杭州地区的标准海塘大多建在软土地基上，经过多年的运行，因堤身和塘闸的变形引起的安全隐患逐渐显现，因此迫切需要开展针对海塘工程实时安全的检测技术研究。目前国内的海塘变形监测主要采用传统的水准测量和 GPS 等手段进行实地观测，这些方法针对离散的观测点能够获取较高时间分辨率、较高精度的测量数据，但是无法获得大范围的海塘变形数据，同时在空间上仅针对由于工程施工过程造成的周边海塘的变形，在时间上也往往局限于新建海塘的施工期和工程完工后的沉降监测，对海塘的自然沉降过程则研究较少。雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术能够获取大范围、高精度的地表三维和形变信息，具有费用低、广覆盖、全天时全天候和高分辨率的特点，特别适用于海塘沉降的大范围监测研究；特别是以永久散射体 (Permanent Scatterers, PS) 技术和小基线子集 (Small Baseline Subsets, SBAS) 方法为代表的时间序列 InSAR (Multi-Temporal InSAR, MTInSAR)，克服了传统 InSAR 技术在空间、时间去相干和大气延迟相位上的影响，使得多基线、长时间序列的 InSAR 地表形变监测成为可能。本文主要利用多时相的 Envisat ASAR 数据，利用 MTInSAR 技术对杭州地区的海塘的形变进行测量，针对海塘的空间分布和散射特性，对 MTInSAR 技术的部分处理过程中的算法进行改进和重新设计，得到海塘的时间序列形变结果，在与同期的水准测量数据验证和结合的基础上，对海塘沉降的规律进行分析。

论文的主要研究内容包括：

(1) **多主影像组合策略中干涉网络的优化选取：**以去相干模型为基础，根据影响雷达回波信号相干性的影响因子，建立了两幅 SAR 影像之间的相干性测度函数，据此得到描述所有干涉组合的相干性测度矩阵；然后结合最小生成树和相干性阈值两种方法进行干涉组合的选取。

(2) **基于分布式目标的自适应空间滤波：**针对海塘现状空间分布的特点，以统计学中的拟合优度检验为基础，识别多时相 SAR 影像中的同质像元 (Statistical Homogeneous Pixel, SHP)，以 SHP 为处理单元，进行自适应的空间滤波，在不损失空间分辨率的情况下，实现线性海塘的干涉相位和相干性准确估计。

(3) **海塘的形变规律分析：**利用改进的 MTInSAR 技术，反演杭州地区的多时相 SAR 数据得到地

面的时间序列形变，与采集到的水准测量数据结合，通过线性回归等手段分析了钱塘江海塘的自然沉降随时间的变化规律。

论文所取得的创新性成果有：

- (1) 根据线状目标的特点，设计并实现了一套适用于海塘的时间序列雷达干涉测量方法；
- (2) 获取了杭州地区全部的 Envisat ASAR 数据，处理得到了杭州地区 2003 年-2010 年时间序列的地面沉降空间分布图。

关键词：海塘, 钱塘江, 沉降, InSAR, 分布式目标, 自适应滤波, 干涉网络, 地形残余坡度

Abstract

The seawalls along banks of the Qiantang Estuary (QE) and Hangzhou Bay (HB) are the oldest coastal defense artificially constructed to protect areas of human habitation and conservation from coastal erosion and other damage due to wave action and storm surge in China. Built upon soft soil foundation, they have turned exposed to the danger of subsidence after years of operation. Therefore, it is important to develop a deformation monitoring technique oriented to seawalls. Conventional leveling and GPS are main techniques for seawalls' deformation measurement and have low data density with high cost and expensive labor. In contrast, Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) can provide measurement of ground surface displacement with high spatial resolution and acceptable accuracy in a wide coverage at an extremely low cost. However, time series analysis of the deformation of linear infrastructure has not been intensively studied and fewer on seawalls.

We have developed a new method of InSAR for the deformation measurement of seawalls, according to their linear distribution and scattering characteristics. First, a new method by combining both minimum spanning tree and coherence threshold was proposed to select the optimum network of interferograms based on the improved correlation estimation model of SAR image pairs. Compared with conventional methods, ours show a more robust connectivity with higher coherent interferograms. Then an adaptive spatial filtering algorithm was designed based on distributed scatterers, which are identified by Goodness-of-Fit test. We tested it with multi-temporal PALSAR data over Yellow River Delta and observed significant improvement in interferometric phase and coherence. Finally, the coherent targets identified by Permanent Scatterers and Small Baseline approaches were processed jointly and unwrapped to retrieve the deformation.

We processed multi-temporal Envisat ASAR data over Hangzhou with the technique depicted above and cross-analyzed it with leveling data. A linear tendency of deformation with local fluctuation was observed during the time series deformation.

Key words: Qiantang River, Seawall, Subsidence, InSAR, Distributed Scatterers (Rosen et al.), adaptive filtering, network of interferograms, residual local slope, Goodness-of-fit, PALSAR, ASAR

目录

摘要.....	4
Abstract.....	6
目录.....	7
第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 实验区与数据源概况.....	6
1.4 论文研究内容.....	7
1.3.1 问题的提出.....	7
1.3.2 主要研究内容.....	8
1.5 论文的组织结构.....	10
第 2 章 InSAR 基本原理.....	11
2.1 InSAR 基本原理.....	11
2.2 去相干分析.....	13
2.2.1 干涉相干.....	13
2.2.2 去相干源.....	16
第 3 章 时间序列 InSAR 的干涉组合网络优化.....	17
3.1 引言.....	17
3.1.1 单一主影像.....	18
3.1.2 多主影像.....	19
3.2 改进的干涉网络组合方法.....	24
3.2.1 相干性测度模型.....	24
3.2.2 干涉网络的选取.....	27
3.3 结果与讨论.....	29

3.3.1 实验区介绍与数据.....	29
3.3.2 实验结果与讨论.....	31
3.4 结论.....	33
第 4 章 基于分布式目标的自适应空间滤波	34
4.1 引言	34
4.2 方法.....	35
4.2.1 SHP 的识别	35
4.2.2 改进的干涉图和相干性估计	38
4.3 实验区概况与数据	39
4.4 实验结果与讨论	40
4.5 结论.....	43
第 5 章 基于时间序列 InSAR 的杭州海塘形变分析.....	44
5.1 实验区背景	44
5.1.1 杭州地区概况.....	44
5.1.2 钱塘江海塘概况.....	44
5.2 数据	46
5.2.1 SAR 数据	46
5.2.2 DEM.....	48
5.2.3 气象数据.....	48
5.2.4 水准测量数据.....	49
5.3 InSAR 数据处理	51
5.3.1 SAR 影像配准.....	51
5.3.2 干涉图生成.....	53
5.3.3 相干目标点的提取.....	54
5.3.4 相位解缠.....	54
5.3.5 AOE、DEM 残差估计	55
5.3 结果与讨论	57
5.3.1 InSAR 结果.....	57
5.3.2 反演精度验证.....	59

5.3.3 海塘形变规律分析.....	60
5.4 结论与展望.....	63
第 6 章 总结与展望.....	64
6.1 研究结论.....	64
6.2 本文的创新点.....	64
6.3 下一步的工作.....	64
参考文献.....	66
参与的科研项目.....	70
发表的文章列表.....	70
致谢.....	71

第1章 绪论

1.1 选题背景

A. 海塘形变监测的意义

随着全球气候变化如海平面上升，极端天气频发和人类活动造成的地面沉降的影响，海洋灾害日益频繁。其中，风暴潮是对我国影响最大、发生频次最高、造成的经济损失最为严重的海洋灾害。2001~2007 年，我国平均每年因风暴潮灾害造成的损失约为 161 亿元。作为风暴潮灾害防御的主要手段之一，海岸防护工程纷纷纳入世界各国的防洪（潮）研究计划。近 30 年来，美国、荷兰、英国、法国、德国等相继出台了多部海岸防护工程的技术导则和指南(水利部, 2009)。我国国务院也已经将台风、暴雨、洪水等灾害监测、预警和应急处置关键技术研究列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006~2020 年）》“公共安全”领域中“重大自然灾害监测与防御”优先主题(国务院, 2006)。海塘的安全运行，关系着沿海地区人民的生命财产安全和社会的经济稳定。

目前，国内的海塘主要分布在江苏、浙江、福建省以及上海市等。在我国东南沿海台风多发区域，海塘沉降十分严重。以浙江为例，现有海塘 2132 公里，分布在长达 6633 公里的海岸线上，其中 89% 的大陆海岸线筑有海塘；由于大多数标准海塘建在软土地基上，且建成运行已有 10 来年，因塘身和塘闸沉降变形引起的安全隐患逐渐显现；据普查分析，该省沿海有 500 多公里的标准海塘已经发生沉降，其中 50% 的海塘沉降量在 30 厘米以上；台州、温州部分海塘沉降甚至达 80-100 厘米(岳德亮, 2009)，这使得原标准海塘的防御能力大大削弱，严重影响海塘的安全运行和防台减灾功效。从 2008 年其，浙江省开始启动“强塘”工程，进行大范围的水库除险加固、海塘配套加固、江堤加固等(浙江省财政厅、水利厅, 2010)。对海塘沉降现象进行长期有效的监测，及时掌握海塘沉降的严重程度，深入研究海塘沉降的变化规律，既可以为水利部门防御台风潮水提供有效参考，也可以为海塘的及时维护和加固提供依据，具有非常重要的意义。

B. 海塘形变监测方法

海堤在土体自重、水压力、地震力等作用下，可能会发生局部或整体破坏，使其挡水功能削弱甚至丧失。海堤一旦发生破坏，不仅海堤工程本身损失严重，往往还会给堤后人民的生命财产造成巨大损失。我国的东南沿海海塘具有距离长、海堤软基处理难度大、结构型式多样、填筑材料复杂等特点

(水利部, 2009)。传统的海塘形变测量方法受制于恶劣气候, 难以适应海塘外部影响和内部响应快速变化, 不能及时可靠评价海塘安全状况。因此迫切需要开展海塘工程实时安全的监测技术研究, 保证海塘的安全问题“早发现、早处置”, 以构筑一道技术先进、稳固的海塘安全屏障。

目前国内对于海塘沉降的监测主要是针对由于工程施工过程造成的周边海塘的变形, 以及新建海塘的施工过程及完工后的沉降监测, 对于海塘的自然沉降则研究较少。采用的研究方法也主要是传统的水准测量和 GPS 等手段实地观测, 或者通过数值模拟和有限元方法等获得模拟结果, 总结出海塘随时间的沉降规律(颜学军 and 孙昌友, 2008)。但这些方法存在的主要问题是仅针对离散点进行处理, 如果要对大范围海塘沉降变形情况进行全面掌握和分析处理, 必须布设大量的监测点, 所耗费的人力物力将非常巨大, 并且测点难以长时间保存。

C. 地面沉降监测方法

目前的地面沉降监测方法主要有: 水准测量、三角高程测量、数字摄影测量、GPS、InSAR、GPS 和 InSAR 的融合(岳建平 and 方露, 2012)。水准测量和三角高程测量是传统的沉降监测技术, 具有测量精度高、成果可靠、操作简便、设备便宜等特点, 但该测量方法作业效率低、劳动强度大、难以实现自动化观测、受降雨等天气的影像。另外, 由于布设的沉降点数量有限, 只能从宏观上掌握海塘沉降的特征, 而沉降的整体分布难以精确得到。GPS 形变监测技术具有全天候、自动化观测等优点, 而且其测量精度高, 结果稳定可靠。但由于 GPS 设备比较昂贵, 一般难以进行大规模的布网监测。并且 GPS 在高程测量上的精度低于其平面测量的精度, 在一定程度上影响了其在海塘沉降监测上的推广与使用。

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 技术, 是合成孔径雷达技术和干涉测量技术的融合, 利用两幅 SAR 影像中的相位信息, 获取大范围、高精度的地表三维和形变信息。其全天时、全天候、广覆盖、高分辨率和速度快等优点以及毫米级的形变监测能力, 特别适用于海塘的沉降监测。

1.2 国内外研究现状

A. 合成孔径雷达干涉测量概述

合成孔径雷达干涉测量技术发展于 20 世纪 60 年代末，它利用两幅合成孔径雷达图像中的相位信息获取大范围、高精度的地表三维信息和变化信息。其中获取地表形变的 InSAR 技术又被称为 DInSAR。经过四十多年的发展，InSAR 拥有了多波段（X/C/L）、多极化（HH/HV/VH/VV）、多分辨率（30m/3m/1m）的丰富数据源，并在 DEM 获取、地图测绘、地球动力学和海洋中得到了广泛应用。

但是在长时间序列的缓慢地表形变监测方法，传统的 InSAR 技术存在三个难以克服的局限：由于不同地物随时间变化产生的时间去相干、由于卫星多次观测的几何变化尤其是空间基线的变化产生的空间去相干以及由于大气本身的非均质性和随时间剧烈的变化性导致的大气延迟相位的影响(Gatelli et al., 1994; Hanssen, 1998; Lee and Liu, 2001; Zebker et al., 1997)。除此之外，InSAR 处理还受系统热噪声等因素的影响，因此其自身的局限性也大大阻碍了其大规模的应用。

B. 时间序列 InSAR 技术的研究现状

自 1999 年意大利米兰理工大学的 Ferretti 提出永久散射体技术以来，时间序列 InSAR (Multi-Temporal InSAR, MTInSAR) 得到了快速发展，最具代表性的方法主要有 PSI、SBAS、StaMPS、STUN、SqueeSAR、QPS 等。长时间序列 InSAR 与传统的 InSAR 显著不同的是，它利用在长时间范围内相位和幅度变化稳定的点的相位特征，实现大气效应的消除，获得高精度的地表形变信息，从而实现长时间尺度上的地表形变分析。其特点如下(Ferretti et al., 2001):

- (1) 在时间、空间基线上超越传统方法的限制，能最大限度地利用 SAR 数据；
- (2) 基于相干目标点的相位解缠和形变反演，提高了相位分析的准确度，降低了大气延迟相位对解缠误差的影响；
- (3) 降低了对于初始 DEM 精度的要求，其运算过程中，会生成高精度的 DEM；
- (4) 测量点密度远远大于其他测绘方法（如 GPS、水准测量）的数据点密度。
- (5) 相较于布设 GPS 观测站和水准测量点，该技术需要的人力和费用小。

永久散射体技术（Persistent Scatterer Interferometry, PSI）由于 Ferretti 等人于 1999 年提出(Ferretti et al., 1999)。其以单一影像作为主影像，生成序列差分干涉图，根据振幅离散指数从一组时间序列 SAR 图像中选取在观测时间内相位保持稳定的点作为永久散射体（Permanent Scatterers），即 PS 点，

并从 PS 点钟获取可靠的相位信息，利用形变模型反演地表的线性速率、形变时间序列和高程残余误差等信息。这些 PS 点受空间、时间去相干和大气延迟的影响小，往往小于分辨单位，主要对应于二面角散射体和单次强散射体，如人工建筑、裸露岩石等(Ferretti et al., 2011)。为保证振幅离散指数的可靠性，该方法需要较多的 SAR，一般不少于 30 幅。

斯坦福大学 H. Zebker 和 A. Hooper 等人于 2006 年发布的 PSI 算法 (Stanford Method for Persistent Scatterer, StaMPS) 以相位稳定性作为选择指标，通过对序列 SAR 干涉相位的稳定性分析，找到噪声水平最小的点作为相干目标点，用于后续输出。该方法无需事先给出形变模型，而是利用三维时空解缠技术获取目标的时序形变信息(Hooper, 2006, 2008; Hooper et al., 2004)。针对 StaMPS 方法，Hooper 开发了开源的基于 Doris、SNAPHU 和 Matlab 的同名数据处理软件，该软件目前在长时间序列 InSAR 处理中得到广泛使用。

德国宇航局 (DLR) 的 B. M. Kampes 等人提取的时空解缠网络算法 (Spatio-Temporal Unwrapping Network, STUN) 是在永久散射体技术的基础上发展起来的另一个改进算法(Kampes, 2006)。和 PSI 相比，它增加了利用随机过程模型来估计 SLC 的观测精度，使用最小费用流解缠算法进行稀疏矩阵上的相位解缠，并通过对解缠相位的时间和空间滤波消除大气相位、噪声相位等残余相位的影响。该算法也有开源的 Matlab 代码，共学习和下载使用。

以上三种方法均属于 PSI 技术。PSI 在城市地区应用广泛，众多的人工地物为 PS 点提供了充足的来源。PSI 技术以稳定的点目标为基础，能够在长时间序列上分析器物理、几何及其变化属性。但是仅在部分干涉图中保持相干性的目标被完全舍弃，且稳定的点目标在非城市地区分布稀少，使得 PSI 技术在实际应用中存在一些局限性。

分布式目标 (Distributed Scatterers, DS) 主要对应于中等相干的地面物体，由均匀分布在分辨单元内的散射体构成，广泛分布于非城市地区，并满足复数条件下的圆高斯分布。SBAS 和 SqueeSAR 方法被相继提出，用于处理分布式目标。

小基线集 (Small Baselines Subset Algorithm, SBAS) 方法由 Berardino 等人于 2002 年提出 (Berardino et al., 2002)，用于研究低分辨率、大尺度上的地表形变。该方法和 PSI 方法最大的区别就是采用了多主影像的干涉组合策略，根据干涉图的空间基线和时间基线的最小化原则选择干涉像对的组合，并根据相干系数图，选择高相干点，对所有干涉条纹图进行相位的解缠和定标，最后利用矩阵奇异值分解 (SVD) 方法求解形变参数和高程误差在最小范数意义上的最小二乘解。SBAS 技术以进过多视处理后的差分干涉图为基础，虽然可以有效提高信噪比，但也带来了一些缺陷，包括降低了图像的几何分辨率，由于不同属性的散射体的混叠产生的更加严重的时间去相干以及非平稳地形和突变形

变信号的平滑导致的空间去相干等。这些缺陷打破了圆高斯分布的信号平稳性前提条件,使得干涉相位和相干图的估计产生偏差,并最终影响形变的反演结果(Zhang et al., 2013; 蒋弥 et al., 2013)。部分学者针对这一问题进行了相关研究,主要分为两类:一类根据 SAR 信号的强度特征,采用区域生长法或者邻域统计法,对局部的非平稳信号进行补偿;另一种采用外部数据或相位模型去除因地形引起的估计窗口内的相位变化。以邻域统计方法选取分布式目标,利用相位模型进行地形相位补偿的方法更为瞩目,能够有效地去除窗口估计中信号不平稳并补偿窗口内的地形相位影响。

相比之下, Ferretti 于 2011 年提出的 SqueeSAR 技术仍然采用单一主影像进行干涉图组合。它通过自适应的空间滤波选取 SAR 强度相似的点作为 DS,并相位三角测量的时间滤波方法对 DS 的干涉相位进行优化估计;然后将 DS 加入到传统的 PSI 处理流程中,将 PS 和 DS 点进行公共处理(Ferretti et al., 2011)。但是 SqueeSAR 仍有一些限制。首先,其用于 DS 点识别的 Kolmogorov-Smirnov 检验过于简单,并不适用于具有长尾分布特点的雷达信号的统计检验。其次, SqueeSAR 仍然没有考虑那些仅在部分干涉图中保持相干的地物目标,包括点目标和分布式目标,限制了其应用范围。

为进一步推广 InSAR 技术在非城市地区的应用,解决永久散射体目标点密度稀疏的缺陷, Perrisin 和 Wang 发展了 QPS 的方法,采用类似于小基线集的多主影像干涉组合方法,在形变场和高程误差反演阶段,只有部分可靠的相干图参与了位置参数的估计,并对干涉图进行滤波,使得该方法能够提取到部分相干目标点,在牺牲了一定精度的反演结果的前提下,具备了处理分布式目标的能力(Wang, 2009; Wang et al., 2011; 陈富龙 et al., 2013)。

1.3 实验区与数据源概况

实验区位于浙江省杭州市市区，为东西向矩形区域，东西长约 60km，南北长约 45km (30°03’30”N~30°25’00”N, 120°04’00”E~ 120°47’30”E)。该区地处长江三角洲南沿和钱塘江流域下游，东临杭州湾，钱塘江从西南向东北方向流经整个实验区范围。杭州市属亚热带季风气候，冬夏季风交替明显，四季分明，降水和日照充足。夏季炎热湿润，冬季则阴冷潮湿；年平均气温 15~17℃，全年一月份最冷，平均气温 3~5℃；七月份最热，平均气温 27~30℃。该地区降水充足，全年平均降水量到 1100~1600mm，主要集中在 3 月至 9 月，年平均降雨日数达 151.9 天(Wikipedia, 2013)。

表 1-1 杭州气候平均数据

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
极端高温 °C	23.9	28.5	32.8	34.8	36.5	39.7	40.5	41.6	38.7	35.0	31.2	26.5	41.6
平均气温 °C	4.6	6.4	10.3	16.2	21.4	24.7	28.9	28.2	24.0	18.8	12.9	7.0	17.0
极端低温 °C	-8.6	-9.6	-3.5	0.2	7.3	12.8	17.5	18.2	12.0	1.0	-3.6	-8.4	-9.6
降水量 mm	80.6	88.2	140.7	123.1	128.6	219.4	172.9	162.1	123.5	78.5	71.5	48.9	1,438.0
相对湿度	75	75	75	74	74	80	76	78	79	76	74	72	75.7
平均降水日数	12.4	12.1	15.3	14.5	13.8	14.6	12.4	13.8	11.7	9.0	9.3	8.5	147.4

来源：中国气象局 国家气象信息中心 2014-01-01

所使用的数据包括 2003 年-2010 年杭州地区的 Envisat ASAR Stripmap 模式的升轨数据 46 景和降轨数据 24 景；验证数据包括钱塘江南北两岸海塘 2009 年 8 月-2012 年 11 月共 8 期的四等水准测量，如下图中的红色线条所示；另外还收集了与 SAR 观测时间对应的杭州地区的历史气象数据；90 m 分辨率的 SRTM3 DEM 数据。



图 1-1 杭州实验区

6

1.4 论文研究内容

1.3.1 问题的提出

相对于一般意义上的城市地表沉降监测，海塘具有线状空间分布；而杭州实验区地处亚热带季风区，四季分明，雨量充沛，因此受时间去相干和大气延迟相位的影响较大，因此常规流程的雷达干涉技术难以有效地实现全范围、高精度的沉降监测。

钱塘江海塘绵延数百公里，海塘周边地理环境复杂多变，使得强散射体的分布少而不均，加之季节分明的杭州地区受时间去相干的影响严重，因此常规的 PSInSAR 方法并不适用；而小基线集方法，能充分挖掘短时间基线和短空间基线的干涉图的相干信息，更适用于相干时间短的地面目标。本文在常规小基线集的方法上，通过改进两幅影像之间的相干性测度模型，优化不同 SAR 影像之间的干涉像对选取方法，更加充分地挖掘潜在的相干信息。

线状目标在多视处理中，会因为估计窗口内与其他目标混叠而导致相干性的估计偏差，因此传统的固定矩形估计窗口并不适用于海塘的相干性估计。理论上，相干系数定义在两个随机平稳的序列 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 上，公式为(Foster and Guinzy, 1967; Touzi et al., 1999):

$$|\gamma| = \frac{|E[s_1(t)s_2^*(t)]|}{\sqrt{E[|s_1(t)|^2]E[|s_2(t)|^2]}} \quad (1-1)$$

在实际应用中，由于 SAR 传感器无法在同一时刻获得 L 次观测，公式(1)中的期望很难获得。因此假设随机过程 $s_1(t)$, $s_2(t)$ 和 $s_1(t)s_2^*(t)$ 都是平稳且各态历经的，然后用估计窗口内 L 个像素的空间平均来代替期望，从而求得相干性的估计量：

$$|\hat{\gamma}| = \frac{\left| \sum_{L=1}^L s_1(t)s_2^*(t) \right|}{\sqrt{\sum_{L=1}^L |s_1(t)|^2 \sum_{L=1}^L |s_2(t)|^2}} \quad (1-2)$$

然而在实际情况中，由于地表特征的复杂性，上述假设在 InSAR 处理中在大多数情况下是不成立的。首先，复杂的地物类型使得窗口内不同地物产生混叠，就算是同一种地物，由于其分布的不均质，也会引起窗口内强度影像的不均质，导致过程 $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 分别不平稳，并相干性估计中产生高估偏差。其次，起伏不均的地势会引起窗口内的系统相位的变化，进而导致过程 $s_1(t)s_2^*(t)$ 不平稳，引起估计偏

差。常规的 InSAR 处理中采用的固定大小的矩形估计窗口，会对影像产生平滑效果，引起空间分辨率的降低，并进一步加重地物的混叠程度。传统的固定大小的矩形窗口不适合于具有线状空间分布特点的海塘，其中降低分辨率的处理也会导致在 SAR 影像上有效宽度只有 18m 的海塘信号和周边地物信号的混叠和丢失。

面向分布式目标的处理方法能够有效地解决估计偏差和分辨率降低的问题。通过识别在地表均质分布的分布式散射目标，提取其不规则的形状边界；后期的处理均以分布式目标为基本处理单元，消除估计窗口内地物不均质带来的非平稳性。然后利用信号分析中的方法，根据极大似然法则估计分布式目标所在的地形残余坡度，并予以消除，减弱窗口内地形变化带来的系统相位的非平稳性。这种基于均质不规则形状的分布式目标的处理方法不会降低图像原有的几何分辨率，因此适用于海塘的形变检测处理。

1.3.2 主要研究内容

针对海塘的自身特点和对 InSAR 技术的要求，按照处理流程先后顺序，设计了四个主要的研究内容：干涉相对的组合优化、分布式目标的识别、给予周期图法的自适应地形滤波和海塘形变规律的分析。

A. 干涉像对的组合优化

传统的相干性预估影响因子为：时间基线、空间基线垂直分量和多普勒质心频率差。根据沿海地区受大气影响严重的特点，增加降水量和时间的季节性变化两个影响因子，能够更加准确地估计干涉图的相干性和干涉相位质量。

对于干涉图连通方法，在传统的相干性阈值法的基础上，增加最小生成树（MST）连通方法，保证全体干涉图的连通和整体形变参数的成功反演，减少人工干预。计算每个干涉图的相干性，用于后期的干涉图解算中的加权处理。

B. 分布式目标的识别

在假设相似地球物理性质的地物具有相似的雷达回波信号的条件，分布式目标在雷达影像上即表现为统计意义上的均质像元（Statistically Homogeneous Pixels, SHP）。因此分布式目标的识别即可转换成图像上 SHP 的识别问题，也即是识别序列 SAR 图像中，在邻域空间范围内具有相同统计分布的像元的集合。

这个问题在统计学上称为拟合优度检验（Goodness-of-Fit, GOF test）。常用的 GOF 方法主要有

Kolmogorov-Smirnov (KS) test, Cramer-von Mises (CM) test, Anderson-Darling (AD) test 和 Baumgartner Weiß Schindler (BWS) test。这些统计的 GOF 检验均以样本的累积分布函数为基础，计算其统计检验量，然后根据一定置信水平上的分位点的值来判断两个样本是否属于同一分布。

多个样本之间的扩散方法主要有区域生长法、区域合并法和邻域空间统计等。

C. 基于周期图法的自适应地形滤波

利用信号分析中的周期图估计方法，根据极大似然法则，计算分布式目标所在区域的地形残余坡度，并通过自适应的地形滤波予以去除，消除因地形起伏不均带来的系统非平稳相位。

根据分布式目标和滤波后的干涉图，重新估计干涉图的相位和相干性。用于后续的长时间序列的形变解算处理。

D. 海塘沉降规律分析

对比实地的水准测量数据和 InSAR 测量数据，分析并评价 InSAR 的测量结果。根据分析，调整 InSAR 处理流程与参数设置，进一步完善。

根据实测数据和海塘的沉降变形规律公式，预测海塘在某一时刻的累积形变量以及海塘的最终沉降量。并与持续跟踪的 InSAR 测量结果进行拟合对比。

综合分析影响海塘变形的因子，并根据这些影响因子调整 InSAR 处理策略。

1.5 论文的组织结构

本文根据海塘自身的特点，对传统的时间序列 InSAR 数据处理流程进行改进，按照流程的先后顺序，章节安排如下：

第 1 章为绪论，介绍了利用时间序列雷达干涉测量研究海塘沉降变形的意义、研究现状；实验区和数据的概况以及论文的主要内容的提出与相应的解决思路；和最后的章节安排。

第 2 章介绍了雷达干涉测量的基本原理，分析了影响干涉测量形变信息提取的因素。

第 3、4 章分别阐述本文针对海塘特点对传统 MTInSAR 方法的改进。其中，第 3 章讲述了在多基线的雷达干涉测量中干涉组合网络的选取和优化；第 4 章介绍了基于分布式目标的自适应空间滤波和相干性估计方法。

第 5 章展示了 MTInSAR 在杭州地区的形变测量和分析结果。首先对杭州地区的地质和钱塘江海塘的构造历史和现状进行了阐述；然后对杭州地区的 InSAR 测量结果进行精度验证；最后对钱塘江海塘近年来的沉降规律进行了初步的分析。

第 6 章对已开展的工作进行总结，并对未来工作进行展望。

第2章 InSAR基本原理

合成孔径雷达干涉测量技术（InSAR）是合成孔径雷达差分干涉测量（D-InSAR）的基础，简单说来 D-InSAR 是在 InSAR 采用立体摄影的方式获取高程信息的基础上，对在不同时间获取的数据提取的高程信息做差分，从而提取形变信息的技术。

2.1 InSAR基本原理

合成孔径雷达干涉测量是利用同一地区观测的两幅 SAR 复数影像进行干涉处理，通过相位信息获取地表高程信息及形变信息的技术。根据成像时间，InSAR 可以分为单次轨道（single-pass）和重复轨道（repeat-pass）两种模式。单次轨道干涉是指在同一机载或星载平台上装载两副天线，其中一副天线发射信号，两副天线都接受地面回波信号，并利用获取的数据进行干涉处理。重复轨道干涉是指同一传感器或相似传感器按照平行轨道两次对地成像，利用得到的数据进行干涉处理。两次成像时 SAR 系统之间的空间距离称为空间基线距，时间间隔称为时间基线。根据空间基线距与平台飞行方向之间的关系，InSAR 又可以分为沿轨（along-track）和横轨（across-track）轨道两种。沿轨 InSAR 是指基线与飞行方向平行，可以用来精确测定地物的运动，如运动物体的变化检测，海洋洋流的速度场等，主要出现在机载双天线中。横轨 InSAR 是指基线与飞行方向垂直，在机载和星载平台中都有出现。目前国际上流行的星载 SAR 传感器，都是重复、横轨轨道模式，本文后面如无特别说明，均是指星载重复轨道横轨工作模式。

地面目标的 SAR 回波信号不仅包括幅度信息 A ，还包括相位信息 ϕ ，SAR 图像上每个像元的后向散射信息可以表示为复数 $Ae^{i\phi}$ 。其中，相位信息还包含 SAR 系统与目标的距离信息和地面目标的散射特性，即

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}R + \phi_{obj} \quad (2-1)$$

式中， 4π 为双程距离相位， R 为 SAR 与地面目标之间的斜距， λ 为波长， ϕ_{obj} 为地面目标

的散射相位。

重复轨道 InSAR 观测的几何关系如图 2-1 所示。S₁ 和 S₂ 分别表示主辅影像传感器，B 为基线距，α 为基线距与水平方向的倾角，θ 为主影像入射角，H 为主传感器的相对地面高度，R₁ 和 R₂ 分别为主辅影像斜距，P 为地面目标点，其高程为 h。设地面目标点 P 两次成像时的图像分别为

$$c_1 = A_1 e^{i\phi_1}, \quad c_2 = A_2 e^{i\phi_2} \quad (2-2)$$

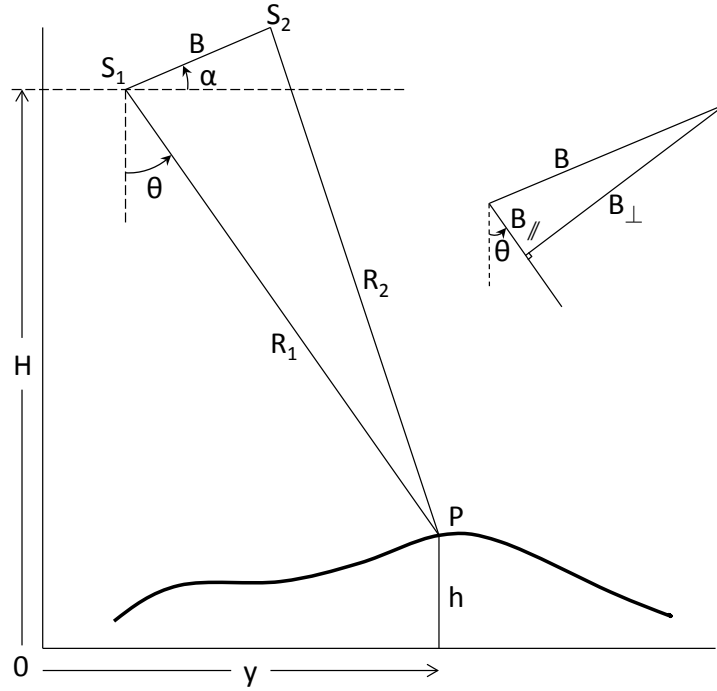


图 2-1 InSAR 原理图

式中， c_1 为主影像， c_2 为辅影像。主辅影像共轭相乘，即可得到复干涉图

$$I = c_1 \cdot c_2^* = A_1 A_2 e^{i(\phi_1 - \phi_2)} \quad (2-3)$$

式中，*表示去共轭。设 ϕ 为干涉相位，则有

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) + (\phi_{obj1} - \phi_{obj2}) \quad (2-4)$$

这里的 ϕ 是真实干涉相位，在实际的图像处理中往往得到的是真实干涉相位在 $[-\pi, \pi)$ 的主

值（缠绕相位），对其进行相位解缠操作即可得到真实干涉相位。

将空间基线距沿着入射方向和垂直于入射方向进行分解，即可得到垂直基线距 $B_{\perp}$ 和平行基线距 $B_{\parallel}$

$$B_{\perp} = B \cos(\theta - \alpha), B_{\parallel} = B \sin(\theta - \alpha) \quad (2-5)$$

则去除平地相位之后，高程和相位之间的一般性公式为：

$$h = -\frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \varphi \quad (2-6)$$

对上式两边去微分，可以得到干涉相位相对高程变化的敏感度，即

$$\Delta h = -\frac{\lambda R \sin \theta}{4\pi B_{\perp}} \Delta \varphi \quad (2-7)$$

上式表明高程的量测精度取决于斜距和基线的比 R/B 。在 SAR 成像系统中，一般 $R \gg B$ ，也即 $\Delta \phi$ 的微小误差经过放大后传递给高程值，也会引起很大误差。

定义 $\Delta \varphi = 2\pi$ 时的高度变化为模糊高度，即

$$h_{2\pi} = -\frac{\lambda R \sin \theta}{2B_{\perp}} \quad (2-8)$$

模糊高度是干涉条纹周期的高差估计，被用来表征干涉相位对地形高程变化的灵敏度(廖明生 and 林琿, 2003)。

2.2 去相干分析

2.2.1 干涉相干

D-InSAR 利用差分干涉相位计算高程和形变参数，其干涉相位的质量决定了最终参数的反演质量，而干涉相位的质量取决于 SAR 影像的质量。SAR 回波信号中不仅包含传感器与地面目标的距离信息，还包含地面目标与雷达信号的反射信息。由于 SAR 影像分辨率有限，单个像元往往含有多个散射体，其像元的信号由分辨单元内多个散射体的回波

信号相干矢量叠加而成（如图 2-2 分辨单元内的散射体回波信号矢量叠加），即

$$c = \sum_i c_i = \sum_i A_i e^{i\phi_{obj}} \quad (2-9)$$

式中， c 为分辨单元的回波信号， c_i 分辨单元内第 i 个散射体的回波信号。如果分辨单元内散射体是随机分布，总的信号将为复高斯分布。如果有一个散射体占主导，则分辨单元将被视为点散射体。

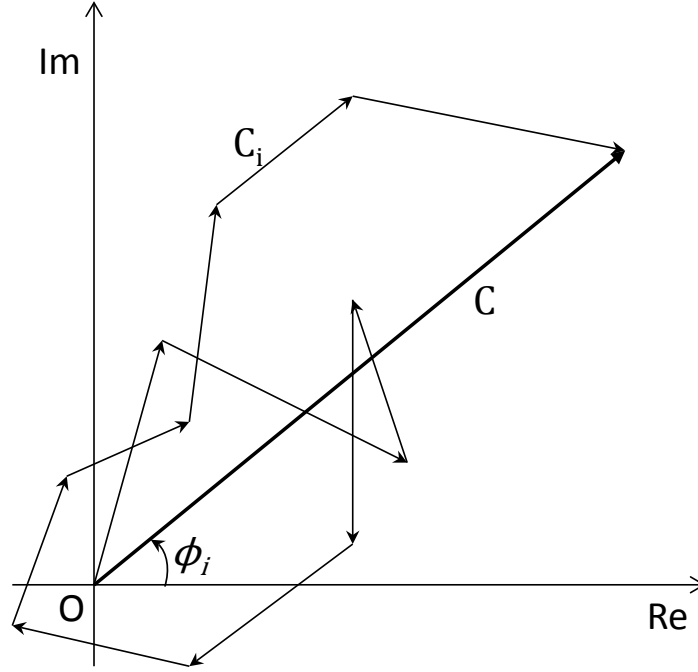


图 2-2 分辨单元内的散射体回波信号矢量叠加

如果两个电磁波的相位之间存在一定的关系，他们就是相干的。相干系数就是表征相干性的重要指标，其定义为(Bamler and Just, 1993):

$$\gamma = \frac{E(c_1 \cdot c_2^*)}{\sqrt{E(|c_1|^2) \cdot E(|c_2|^2)}} \quad (2-10)$$

式中， $E()$ 表示期望值。相干系数与干涉相位的稳定性有关。假设散射体服从高斯分布，则干涉相位的概率密度函数 pdf (Bamler and Hartl, 1998) 为

$$pdf(\phi) = \frac{1-|\gamma|^2}{2\pi} \cdot \frac{1}{1-|\gamma|^2 \cos^2(\phi-\phi_0)} \cdot \left\{ 1 + \frac{|\gamma| \cos(\phi-\phi_0) \arccos[-|\gamma| \cos(\phi-\phi_0)]}{\sqrt{1-|\gamma|^2 \cos^2(\phi-\phi_0)}} \right\} \quad (2-11)$$

式中, ϕ_0 为真实相位, 如图 3-2 所示。干涉相位标准差 σ_ϕ 有

$$\sigma_\phi^2 = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arcsin(|\gamma|) + \arcsin^2(|\gamma|) - \frac{Li_2(|\gamma|^2)}{2} \quad (2-12)$$

式中, σ_ϕ^2 为方差, $Li_2()$ 为二次对数函数(dilogarithm), 相位标准差随相干系数的变化关系如图 3-3。

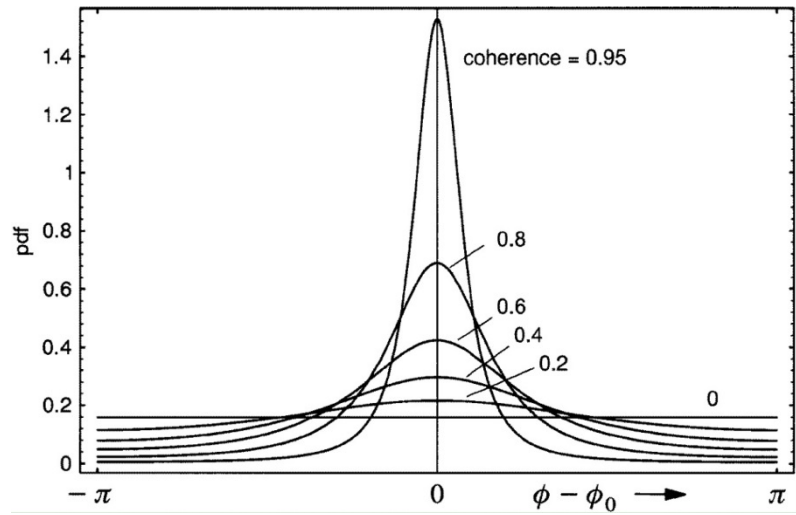


图 2-3 干涉相位随相干系数的的概率密度曲线 (Bamler and Hartl, 1998)

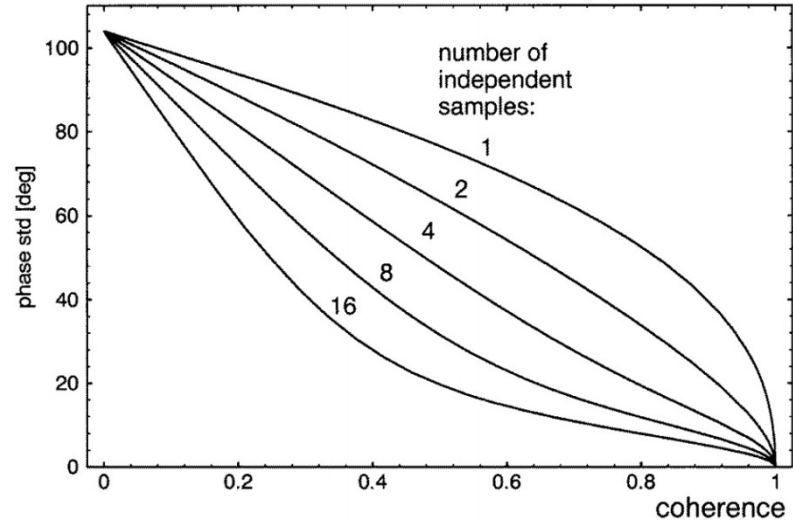


图 2-4 干涉相位标准差随相干系数和窗口大小的关系 (Bamler and Hartl, 1998)

可知看出，当相干系数增加时，相位分布更加集中于真实 ϕ_0 ，相位的标准差越小，也就是说相位噪声减小，相位稳定性增加。

2.2.2 去相干源

干涉图的相干性代表了雷达回波信号之间的干涉质量，但在信号的接收与数据处理过程中存在着去相干的影响因素，使得干涉图的相干性降低，并影响最终的高程和形变的反演精度。主要的去相干的影像因素包括以下六类 (Bamler and Hartl, 1998; Zebker and Villasenor, 1992):

- (1) 时间去相干 $\gamma_{temporal}$;
- (2) 空间基线去相干 $\gamma_{spatial}$;
- (3) 方位向旋转/多普勒质心去相干 $\gamma_{rotation}$;
- (4) 体散射去相干 γ_{vol} ;
- (5) 系统热噪声去相干 $\gamma_{thermal}$;
- (6) 数据处理去相干 $\gamma_{process}$;

因此，总的去相干可表示为：

$$\gamma_{total} = \gamma_{temporal} \cdot \gamma_{spatial} \cdot \gamma_{rotation} \cdot \gamma_{vol} \cdot \gamma_{thermal} \cdot \gamma_{process} \quad (2-13)$$

其中，时间去相干只是成像区地物随着时间变迁、地表运动等因素发生散射特性变化产生的；空间基线去相干是由于干涉影像不同入射视角差在距离向地物频谱投影到数据频谱时产生的频谱偏移引起的；方位向旋转去相干是由于方位向上的视角差导致的主辅影像干涉对的多普勒质心频率差引起；体散射去相干主要针对有一定几何分层、具有体积的散射体，它是雷达波经过多次散射造成的去相干，其对应的典型地物为具有分层结构的森林；系统热噪声去相干主要受到卫星传感器系统的影响；数据处理去相干是指一切由数据操作而导致的去相干，如主辅影像的配准、辅影像重采样、插值等处理。

第3章 时间序列InSAR的干涉组合网络优化

在时间序列雷达干涉测量中，干涉像对的选取是完成配准、重采样等预处理之后的第一步；特别是小基线子集 (SBAS) 雷达干涉测量，其通过选取具有短空间基线和时间基线的 SAR 影像组成干涉像对集合，然后根据最小二乘原理实现序列形变信息的解算。好的干涉组合，能够充分挖掘并利用 SAR 影像之间的相干信息，组建高相干性的干涉网络，保证后续相位解缠的稳定和可靠，且不会显著增加计算负担。本文根据传统的小基线子集方法，在常规的时间基线、空间基线的垂直分量和多普勒质心频率差三个相干性影响因子的基础上，增加了时间基线的季节性变化、降水量两个影响因子，用于预估干涉对的相干性；然后根据计算得到的相干矩阵，选取具有高相干性的像对参与后续的时间序列形变反演。本文所用的选取方法能够实现：(1) 更加准确地预估干涉对的相干系数；(2) 考虑了严重的大气延迟相位的影像，保证后续解算的稳定可靠；(3) 计算了所有的干涉组合可能，在保证相干性的基础上，最大化利用了干涉组合的冗余信息。

3.1 引言

为获取长时间序列的地表形变信息，时间序列雷达干涉测量 (Time Series InSAR, TSInSAR) 在处理过程中往往会使用十几幅甚至几十上百幅 SAR 影像。它们在经过配准、重采样等预处理之后，通过两两组合形成干涉对；这一系列的干涉对组成的干涉组合网络和振幅信息一起，用于相干目标点的识别和提取；最后基于相干目标点，利用它们在干涉组合网络中的相位信息进行时空相位解缠，得到地球表面在这些点上的时间序列形变信息。因此，干涉像对的选取是时间序列 InSAR 处理的第一步 (预处理除外)。对于差分干涉形变测量来说，空间基线垂直分量与 DEM 的参与误差成正比，因此空间基线长度越小越好；对于测量微小的地表形变 (如地面沉降) 来说，获取的影像必须覆盖较长的时间范围，而长时间跨度的干涉图又极易导致失相干；此外两幅影像之间的多普勒质心频率的差异也直接影响到干涉图的相干性，当然这种影像可以再后续的方位向和距离向滤波中予以减弱。因此在时间序列的雷达干涉测量中，筛选提高干涉测量结果质量的干涉组合网络是 InSAR 数据处理过程中的重要步骤，而随着 SAR 影像数量的增加，优化干涉组合网络的问题变得更加突出。

根据组合中主影像的个数，可以将常见的干涉像对的组合策略分为两种：单一主影像和多主影像。

3.1.1 单一主影像

单一主影像组合策略在所有 SAR 影像中选取其中一个作为主影像，其他所有 SAR 影像作为辅影像分别于主影像生成干涉图。SAR 影像的数量记为 N ，则生成的干涉图的数量为 $M=N-1$ 。其主要应用在永久散射体雷达干涉测量 (Permanent Scatterer Radar Interferometry, PSInSAR) 中 (Ferretti et al., 2000; Ferretti et al., 2001)。由于这种组合结构完全由其主影像决定，因此单一主影像的干涉组合研究主要集中于最佳主影像的选取。传统的 PSInSAR 技术基于时间基线最佳的原则，即选取位于时间跨度中间的 SAR 影像作为公共主影像 (Colesanti et al., 2002; Ferretti et al., 2001)，而没有考虑其他显著影响干涉像对相关性的空间基线和多普勒质心频率；随着技术的发展，Zhang Hua 等人提出了一种基于时间和空间基线的主影像优化选取算法 (Hua et al., 2005)；陈强等人提出了干涉像对的相干性测度函数，并加入了多普勒质心频率差影响因子，通过设置三个影响因子的阈值和贡献程度，计算得到最优主影像 (陈强 et al., 2008)；王洒等人加入系统热噪声和时间基线的季节性变化的影响，进一步优化了干涉相对的相干性测度函数 (王洒 et al., 2013)。与之前基于相干性测度的方法不同，陶秋香等人则利用三基线最小的方法，选取公共主影像，其最大的特点就是简单明了，计算速度快 (陶秋香 and 刘国林, 2011)。

总的来说，单一主影像的组合策略研究比较简单、透彻，加入了季节性变化的相干性测度函数能够方便快速地选取最佳公共主影像；而这种干涉图网络结构简单，在保证时间序列形变可解的情况下使得参与的干涉图最少，计算效率高；它的缺点则是无法满足所有干涉像对的短时间和空间基线的需求，因此可能导致部分干涉图的去相干现象严重；特别是在非城市区域的长时间跨度的形变反演中，由于人工地物少，散射特性随时间变化剧烈，会导致部分长时间基线和空间基线的干涉图完全失相干，进而降低了 PS 测量点的质量的空间分布密度。

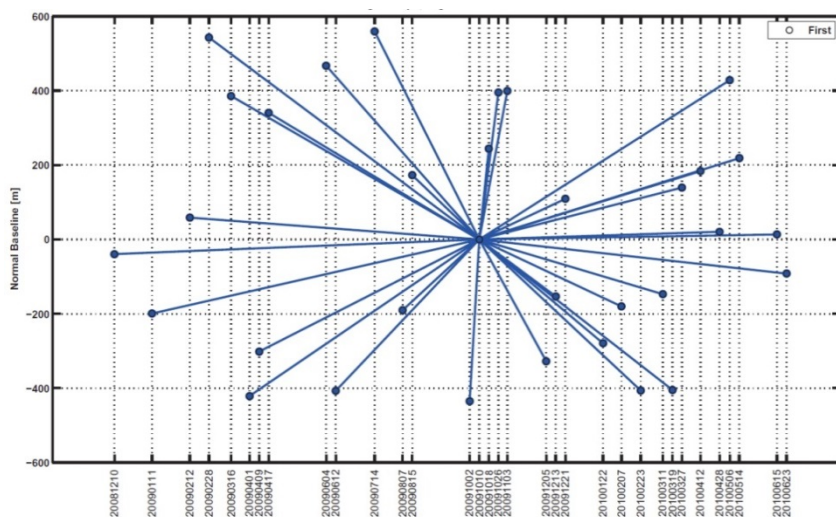


图 3-1 单一主影像干涉组合 (Perissin et al., 2012)

3.1.2 多主影像

多主影像组合策略与单一主影像最明显的不同之处就是每个 SAR 影像均有成为主影像的可能。该策略根据某种规则将所有 SAR 影像进行两两配对，形成干涉组合网络；不同的配对规则就会产生不同的干涉图组合。因此在多主影像组合策略中，规则的制定尤为重要；相较于单一主影像组合策略来说，也更为复杂。

为保证形变可解 (Sansosti et al., 2010)，干涉图数量 M 的需满足如下式。因此，在多主影像的组合策略中，选取规则的制定

$$N-1 \leq M \leq \frac{N(N-1)}{2} \quad (3-1)$$

其中， N 为 SAR 影像的数量。

多主影像的组合策略非常灵活，针对不同的数据情况和应用需求，国内外学者尝试了不同的干涉组合选取方法。Shi Xuguo 等人对同一个数据集分别设计两个干涉子集：一个由短时间基线和中等长度的空间基线的干涉图组成，用于新建高速公路的 DEM 估计；一个由长时间基线和短空间基线的干涉图组成，用于地表形变信息的反演，该方法有效消除了由于地表土地利用类型发生变化引起的 DEM 误差对形变相位的影响 (Shi et al., 2014)。Fattahi 等人为了验证 DEM 残余误差与空间基线的关系，设计了零空间基线干涉网络、时间顺序干涉网络、Delaunay 干涉网络、小基线干涉网络和树状干涉网络证明了在时间序列 InSAR 中，DEM 误差的影像取决于干涉网络的空间基线垂直分量的总范围而不是某一个干涉图的垂直空间基线 (Fattahi and Amelung, 2013)。由于这些组合有实际情况的特殊性，不适合通用和推广，因此在这里不进行深入讨论。

通用情况下的干涉网络选取方法是从小基线集技术开始的。小基线集方法将所有 SAR 数据组合成若干个子集，使得子集内部的 SAR 影像之间基线距小，而不同子集之间的 SAR 影像的基线距大 (Berardino et al., 2002; Lanari et al., 2004)。这种方法利用影响去相干的三个影响因子：空间基线垂直分量、时间基线和多普勒质心频率差，分别设定阈值，选取空间、时间、多普勒基线均小于一定数值的干涉像对 (如图 3-2-d 所示)。该方法快速简单，能够有效避免选取到因为空间基线过长而产生严重的空间去相干的干涉图，大大增加了参与后续反演的干涉图的数量。但是，该方法在较大的阈值情况下，会生成过多的干涉像对，大大增加计算的工作量；而在较小的阈值设定下，又容易产生多个小基线集之间相互分离的情况，进而在时间序列反演时产生秩亏而无法得到完整序列的形变信息。为了解决这个问题，Berardino 等人用奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD) 方法将多个小基线集联合起来进行求解；但人工调整干涉对使得全局连通的目前更常被人们使用。

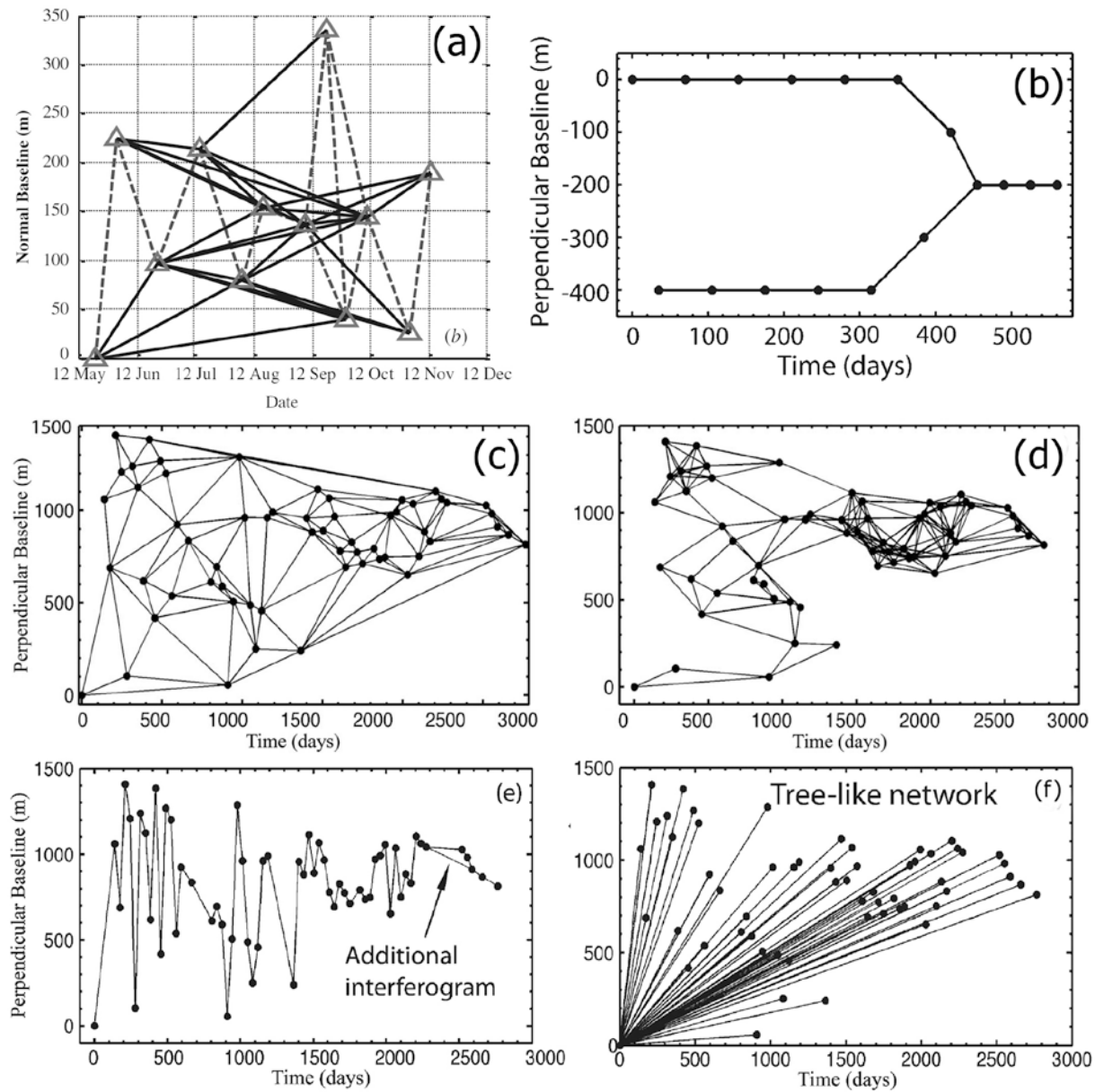


图 3-2 多主影像干涉网络(Fattahi and Amelung, 2013; Shi et al., 2014)

StaMPS/MST (Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR) 中采用相干性测度阈值法 (Coherence Threshold, CT) 选取高相干的干涉像, 该方法以去相干的简易模型 (Zebker and Villasenor, 1992) 为基础, 利用空间基线垂直分量、时间基线和多普勒质心频率差建立干涉相对的相干性估计函数, 得到所有可能干涉组合的相干性测度, 然后通过设定的相干性阈值 ρ_{min} , 选取符合条件干涉像对 (Hooper, 2008), 公式如下:

$$\begin{aligned}\rho_{total} &= \rho_{temporal} \cdot \rho_{spatial} \cdot \rho_{doppler} \\ &\approx \left(1 - f\left(\frac{T}{T^c}\right)\right) \left(1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp}^c}\right)\right) \left(1 - f\left(\frac{F_{DC}}{F_{DC}^c}\right)\right)\end{aligned}\quad (3-2)$$

其中,

$$f(x) = \begin{cases} x, & \text{for } x \leq 1 \\ 1, & \text{for } x > 1 \end{cases} \quad (3-3)$$

ρ 表示相干性; 上标 c 表示各参数临界值, 即某项参数超过此数值干涉图就会完全失相干; 对于干旱地区的 ERS 数据, $T^c=5$ years, $B_{\perp}^c=1100$ m, $F_{DC}^c=1380$ Hz。以上公式没有考虑评价因子的符号问题, 而因子的正负号只是由于干涉图中主辅影像顺序的变化, 并不影响最终的干涉结果; 即对于同一个干涉组合中的某一个干涉图, 可能会出现 $(1 - f(x))$ 和 $(1 + f(x))$ 两种情况, 通过给 $f(x)$ 添加取模符号可以解决问题 (潘斌, 2010), 改进后的 $f(x)$ 为:

$$f(x) = \begin{cases} |x|, & \text{for } |x| \leq 1 \\ 1, & \text{for } |x| > 1 \end{cases} \quad (3-4)$$

改进后的相干性测度方法能够选取高相干性的干涉组合, 使得计算结果更加稳健。但是和小基线集方法一样, 存在着子集之间相互独立的缺陷。

为了保证干涉图的全局连通, 在 CT 方法的提取结果的基础上, 对每一个 SAR 影像选取与其相干测度值最大的影像与之组成干涉对, 而不论该最大值是否达到之前设定的相干性测度阈值。但是该方法无法保证被隔离的小集合内的 SAR 影像所对应的最大相干测度 SAR 影像也可能属于该小集合, 从而使得干涉网络的仍然没有全局连通。记所有 SAR 影像组成的几何为 S , s_i 为其中任意一景影像, 则 $s_i \in S, i = 1, 2, \dots, N$; 若在相干性测度阈值法中, 所有的干涉像对组合被分成的互不连通的几个子集, 记其中一个为 P , 其包含的 SAR 影像记为 s_j , $P \cup P^C = S$, n 为 P 中的 SAR 影像数量。可能存在如下情况: $\forall s_j \in S, i = 1, 2, \dots, n$, 与其相干性测度最大值对应的 SAR 影像为 $s_{jcorr} = \arg \max_{s_i} (\rho_{s_j, s_i})$, 有 $s_{jcorr} \in S$ 。此时干涉子集 P 仍然与其他子集相互独立、互不连接。

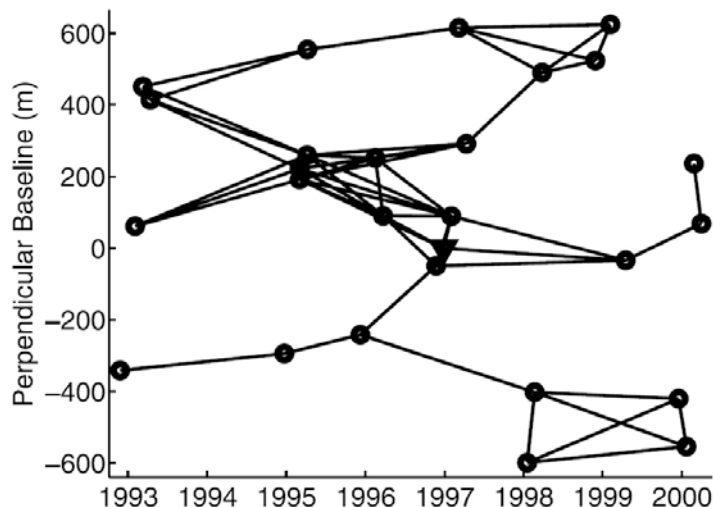


图 3-3 相干性测度阈值法干涉网络 (Hooper, 2008)

小基线方法和相干性估计函数的方法都是通过 SAR 影像之间的成像几何参数来估算干涉对的相干性，而最小生成树 (Minimum Spanning Tree, MST) 方法直接通过一组给定点集的相干系数平均值来表示干涉对的相干性，得到 $N(N-1)/2$ 个干涉组合的相干性矩阵，然后通过 MST 搜索得到 $N-1$ 个连接全局的干涉图网络 (Perissin et al., 2007; Perissin and Wang, 2012; Wang et al., 2011)。该方法利用最少数量的干涉像对，保证了所有 SAR 影像之间的联通，使得在时间序列形变可解的前提下，达到高相干性和低计算量的折中。与 PSInSAR 中的单一主影像组合方法相比，MST 方法所用的干涉图数量相同，但是所形成的干涉网络相干性更高，形变的解算更加稳健。另外，MST 的方法也可通过适当修改来增加干涉对的数量 (Perissin et al., 2007)。其缺点是干涉图的相干性用一组给定的点集的相干系数来代替，人为因素较强，且相较于其他方法来说，计算量较大。

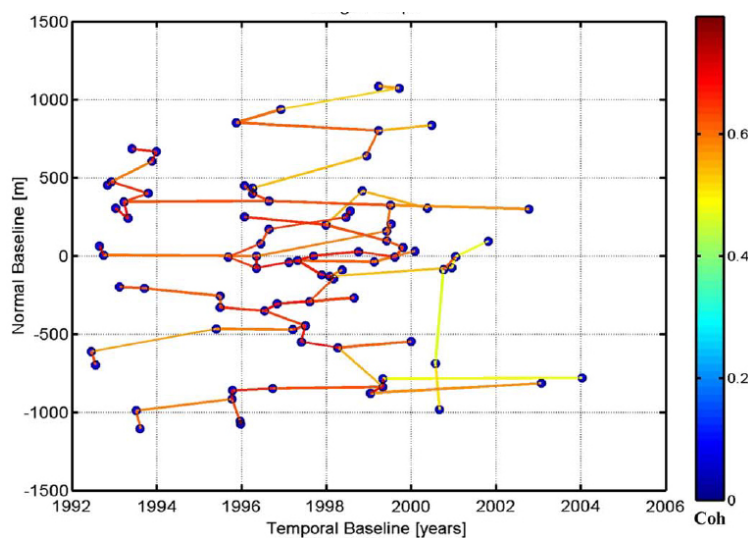


图 3-4 MST 干涉网络 (Perissin, 2012)

以上三种方法均根据相干性或相干性的测度来选取干涉对网络，潘斌等人则提出一种聚类分析的方法用于干涉像对的选取。该方法通过选择合适的去相干因素构建特征空间，将所有的干涉组合的特征投射到该特征空间，从而将干涉像对的选取问题转换为了特征空间上的聚类问题，然后设计相应的聚类算法实现干涉像对的选取(潘斌 and 舒宁, 2010)。

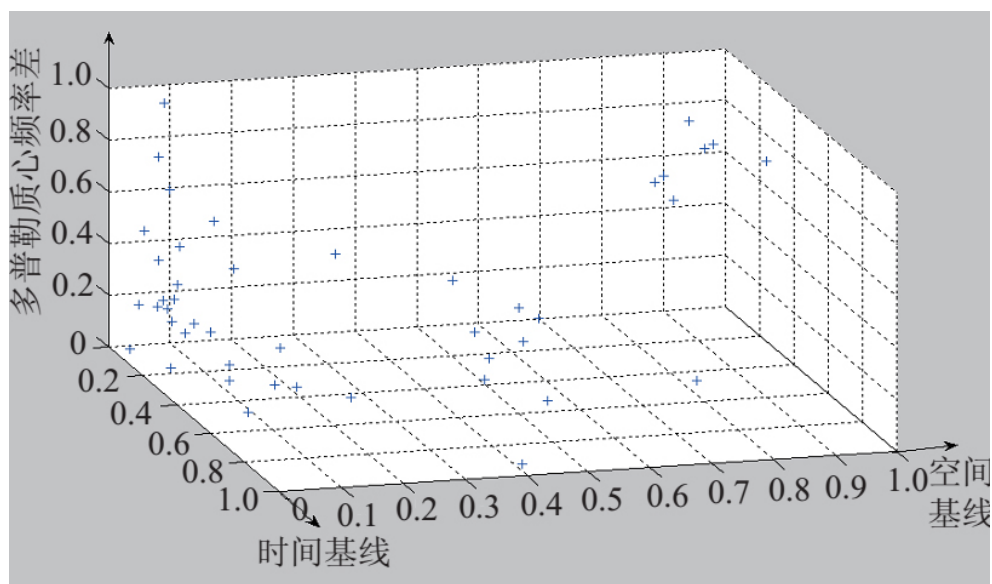


图 3-5 特征空间聚类 (潘斌, 2010)

3.2 改进的干涉网络组合方法

在长时间序列的雷达干涉数据处理中，为了最终形变信息成功反演，干涉组合的选取需保证以下几点：

- 1) 全局时间范围内的形变信息可解；
- 2) 在不显著影响计算效率的情况下，尽可能多地选取高相干性的干涉图参与形变反演；
- 3) 尽可能准确地估计干涉图的相干性。

其中，第 3 点是第 2 点的基础。

基于以上三个原则，结合目前各种干涉网络组合方法的优点，本文提出一种新的多主影像的干涉网络选取方法。为了更加准确地估计相干性，从去相干模型出发，得到雷达信号之间的相干性与空间基线垂直分量、时间基线和多普勒质心频率三个影响因子的关系；在干涉图的连通方法上，综合利用 MST 和相干性测度阈值 (CT) 两种方法的选取策略，满足了全局时间序列形变可解和高相干性干涉图的要求。

3.2.1 相干性测度模型

雷达回波信号之间的相干性不仅取决于观测地物本身的属性，也会受到传感器在两次观测时几何关系和传统本身的系统热噪声的影响，其总的相干性 ρ_{total} 可表示为(Zebker and Villasenor, 1992):

$$\begin{aligned}\rho_{total} &= \rho_{temporal} \cdot \rho_{geometric} \cdot \rho_{thermal} \\ &= \rho_{temporal} \cdot \rho_{spatial} \cdot \rho_{rotation} \cdot \rho_{thermal}\end{aligned}\tag{3-5}$$

其中， ρ 表示相干性；成像几何去相干 $\rho_{geometric}$ 包括距离方向上由于干涉影像之间雷达波束的不同入射角产生的空间基线去相干 $\rho_{spatial}$ 和方位向上由于地物相对雷达照射方向旋转而产生的旋转去相干 $\rho_{rotation}$ ，也被成为多普勒质心去相干 $\rho_{doppler}$ (Hooper, 2006)。

A. 系统热噪声去相干

系统热噪声主要受传感器特征，如天线增益等的影响，其去相干影响可由信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)来表示(Zebker and Villasenor, 1992):

$$\rho_{thermal} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}}\tag{3-6}$$

对于固定模式的卫星传感器，SNR 可以视为一个常数，比如 ERS-1/2 的 SNR 值为 11.7 (Zebker et al., 1994)，Envisat-ASAR 在 Stripmap I2 模式下的 SNR 为 19.5 (Guarnieri, 2013)。

B. 空间基线去相干

干涉像对在距离向和竖直方向组成的平面上的几何关系如图 3-6 所示，其中 A1、A2 两个天线对地面上同一点分别以入射角 θ_1 和 θ_2 进行观测；记方位向上的距离为 x ，地距向上的距离记为 y ；传感器到地面像元中心的距离为 r 。由于两次观测的入射角不同，雷达信号在距离向地物频谱投影到数据频谱时会产生偏移，产生去相干，其关系可表达为 (Zebker and Villasenor, 1992)：

$$\begin{aligned}\rho_{spatial} &= 1 - \frac{2\cos\theta|\delta\theta|R_y}{\lambda} \\ &= 1 - \frac{2\cos\theta|B_{\perp}|R_y}{\lambda r}\end{aligned}\quad (3-7)$$

式中， R_y 表示传感器的距离向空间分辨率， λ 为雷达波长， $B_{\perp}$ 表示空间基线垂直分量。当 $B_{\perp}$ 达到最大临界值 $B_{\perp}^c$ 时， $\rho_{spatial}$ 取最小值零，即两幅影像完全失相干，此时有 (Zebker and Villasenor, 1992)：

$$B_{\perp}^c = \frac{\lambda r}{2\cos\theta R_y} = \boxed{\frac{\lambda r B_y \tan\theta}{c}} \quad (3-8)$$

式中， c 表示光速。对于 ERS-1/2 来说， $B_{\perp}^c = 1100$ m；对于 Envisat-ASAR Stripmap I2 数据来说， $B_{\perp}^c = 1066$ m。

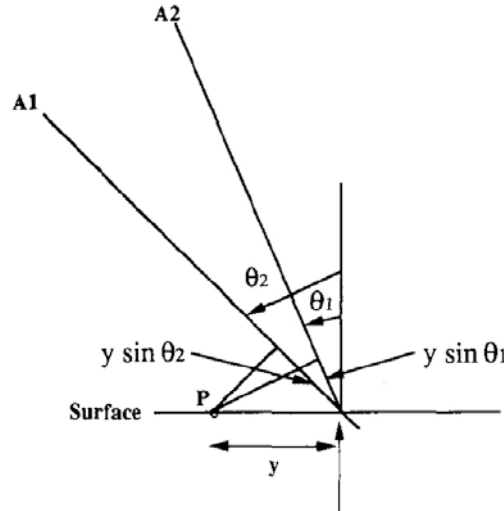


图 3-6 干涉像对的几何成像关系 (Zebker & Villasenor, 1992)

利用公式(3-4)和(3-8)，则公式(3-7)可表示为：

$$\rho_{spatial} = 1 - f \left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp}^c} \right) \quad (3-9)$$

C. 方位向旋转去相干

方位向旋转去相干，也叫多普勒质心去相干，它是由于雷达在两次观测方位向上斜视角 (Squint Angle) 的差异，使得地物相对于雷达波束照射方法发生旋转，而产生的；示意图如下：

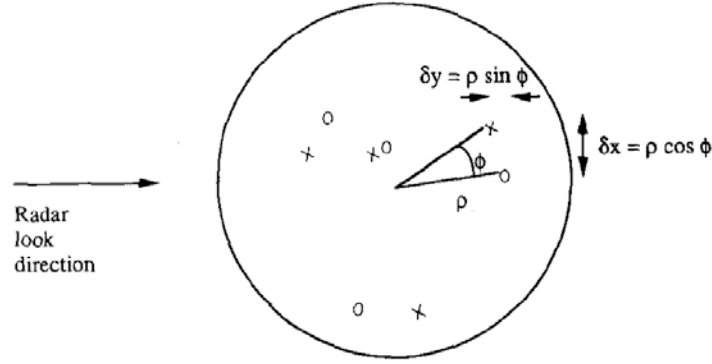


图 3-7 地物相对于雷达照射方向旋转 ϕ ，使得散射中心从 x 移动到了 o (Zebker and Villasenor, 1992)

这种斜视角的变化在 SAR 影像的方位向上产生多普勒质心频率的偏移，使得两景影像的多普勒频率不完全重叠，当斜视角的差异达到临界值，使得多普勒质心频率差异 F_{DC} 超过影像方位向上的数据带宽 B_{az} 时，干涉像对就会完全失相干，其关系可用下式表示 (Butterworth, 2008; Elachi and Van Zyl, 2006; Zebker and Villasenor, 1992; 潘斌, 2010):

$$\begin{aligned} \rho_{rotation} &= 1 - \frac{2 \sin \theta |d\phi| R_x}{\lambda} \\ &= 1 - f \left(\frac{F_{DC}}{B_{az}} \right) \end{aligned} \quad (3-10)$$

式中， R_x 表示传感器的方位向空间分辨率， ϕ 表示斜视角。随着传感器制造工艺的发展，目前的主流 SAR 传感器在同一模式下的 F_{DC} 较小，因此由其组成的干涉像对受方位向旋转去相干影响较小。对于 Envisat-ASAR Stripmap I2 数据， $B_{az}=1316$ Hz。

D. 时间去相干

成像区地物随着时间的变化、地表的运动，其散射特性会发生变化；两次观测时，由于大气而产生的雷达信号延迟相位也不同一致；这些散射目标在重复轨道两次观测期间的变化，都会产生时间去相干。对于水体而言，由于表面时刻变化，其相干时间只有几十微秒，只有机载的干涉成像雷达才能

得到高相干的干涉影像；对于农作物开垦区或者植被覆盖区域，由于植被自身生长情况的差异，其相干时间可为数小时到数天，且相干性受环境因子（雨雪、温度等）和人类活动（土地翻垦）的影响很大；而对于裸露岩石或者人工建筑物而言，其自身散射特性非常稳定，在长达数年的时间跨度内也能保持高相干性(陈富龙 et al., 2013)。对于地物的散射特性变化，可以针对应用的需求建立预测性的模型来表达时间去相干随时间的变化，但这部分内容将留在后期的工作进行。基于通用性的需求，可认为同一种类型的地物随着时间跨度的增加，在长时间范围内，其相干性会呈现降低的趋势。因此，可以将时间去相干用经验公式表达为：

$$\rho_{temporal} = 1 - f\left(\frac{T}{T^c}\right) \quad (3-11)$$

式中， T^c 为时间基线的临界值。对于干旱地区的 C 波段 SAR 影像， $T^c=5$ years (Hooper, 2006)。

总结以上分析，SAR 图像之间的相干性可以表示为：

$$\begin{aligned} \rho_{total} &= \rho_{temporal} \cdot \rho_{spatial} \cdot \rho_{rotation} \cdot \rho_{thermal} \\ &= \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \cdot \left(1 - f\left(\frac{B_{\perp}}{B_{\perp}^c}\right)\right) \cdot \left(1 - f\left(\frac{F_{DC}}{B_{az}}\right)\right) \cdot \left(1 - f\left(\frac{T}{T^c}\right)\right) \end{aligned} \quad (3-12)$$

3.2.2 干涉网络的选取

相干性测度模型解决了干涉网络选取的第 3 点要求；第 1、2 点要求则通过后续的干涉像对的选取规则来达到。根据相干性测度模型，可以计算得到任意两幅 SAR 影像之间的相干性测度；将所有可能组合的干涉像对的相干性测度组合，可以得到一个 $N \cdot N$ 大小的相干性测度矩阵 P (后面简称为相干矩阵)，如下所示：

$$P = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1N} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \cdots & \rho_{NN} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

式中， ρ_{ij} 即表示第 i, j 幅影像组成的干涉图的相干性测度；该矩阵对角线上的所有元素 $\rho_{i,i}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 的值均为 1，因为图像与其本身之间没有去相干现象；而除对角线外的其他元素的值均为 $[0, 1]$ 之间的实数；由于第 i, j 幅影像之间的相干性与第 j, i 幅影像的相同，所以该相干矩阵为对称矩阵。它包含了所有可能的 SAR 影像组合，如图 3-8 所示。

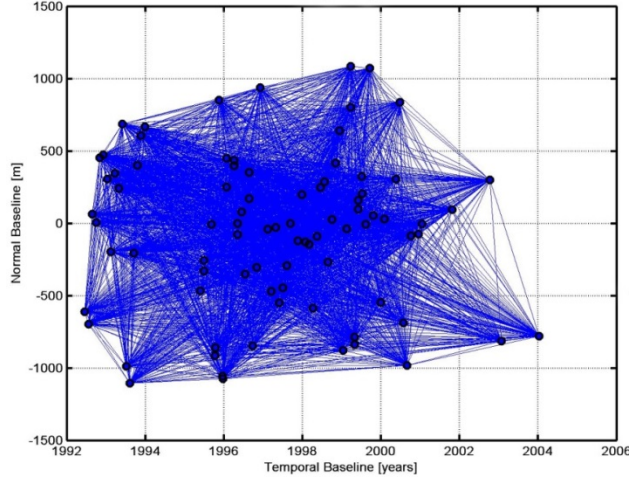


图 3-8 所有可能的干涉图组合 (Perissin et al., 2007)

利用相干矩阵 P ，多主影像的干涉网络选取问题可以转换为带权的无向网络图中的路径搜索问题：以一个节点表示 SAR 影像，两幅影像之间的连线表示干涉处理，构成图上的一条边，其相干性测度即为边的权重；由于干涉处理与方向无关，所以形成了一个无向图。而干涉网络选取的第 1、2 点原则可重新解释为：

- 1) 无向图的全局连通性；
- 2) 在连接边数量给定情况下，使得连接边的权重最大化。

对于具有 N 个节点的连通图，最少具有 $N-1$ 条边，可利用最小生成树 (Minimum Spanning Tree, MST) 算法选择权重最大的连接路径，具体实现时，将相干性测度取倒数，则用 MST 搜索得到的最小连通图所含的边即为用 $N-1$ 条边使得全局连通下所能包含的最大相干性总和。本文使用 MST 的 Prim 算法来搜索由相干矩阵的元素值的倒数构成的最小权重生成树，其选取的连接边所对应的干涉组合即为 MST 方法所选的干涉像对组合。

为了进一步增加高相干性的干涉图的数量，可通过阈值法来选择所有满足某一阈值条件的干涉像对组合；为了算法实现的简单化，将给定干涉图数量的约束条件转换为给定相干性阈值，第 2 点要求即为根据相干矩阵，通过阈值法选取所有相干性测度大于或等于某一阈值的干涉像对，组成干涉网络的标记矩阵 IFG ，即：

$$IFG = \begin{bmatrix} ifg_{11} & ifg_{12} & \cdots & ifg_{1N} \\ ifg_{21} & ifg_{22} & \cdots & ifg_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ifg_{N1} & ifg_{N2} & \cdots & ifg_{NN} \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

$$ifg_{ij} = \begin{cases} 1, & \rho_{ij} \leq \rho^c \\ 0, & \rho_{ij} > \rho^c \end{cases} \quad (3-15)$$

式中， ρ^c 即为设定的相干性测度阈值。

为了进一步增加时空网络解缠的稳健性，通过 Delaunay 三角网，对全局的干涉组合均匀加密。由于 Delaunay 三角网会选取地相干性干涉图，因此需要设定一个阈值，避免低相干干涉图引入噪声。在之前的基于相干性测度的阈值法中，已经选取了所有满足相干性阈值的干涉组合，且该值一般较高(>0.7)，因此在 Delaunay 三角网方法中，将相干性阈值降低一定量值，如 0.3。

最后，将以上三种方法选取的干涉像对组合去并集，即得到本文最终选定的干涉网络。

3.3 结果与讨论

3.3.1 实验区介绍与数据

本文选取了杭州地区 2006-2010 年的 31 景 Envisat ASAR Image Mode Stripmap I2 模式的升轨数据，来验证干涉网络选取方法的有效性。实验区的范围为：82 km × 60 km (30°03'30"N~30°25'00"N, 120°04'00"E~120°47'30"E)，如图 3-9 所示。该区地处长江三角洲南沿和钱塘江流域下游，东临杭州湾，钱塘江从西南向东北方向流经整个实验区范围。杭州市属亚热带季风气候，冬夏季风交替明显，四季分明，降水和日照充足。夏季炎热湿润，冬季则阴冷潮湿；年平均气温 15~17℃，全年一月份最冷，平均气温 3~5℃；七月份最热，平均气温 27~30℃。该地区降水充足，全年平均降水量到 1100~1600mm，主要集中在 3 月至 9 月，年平均降雨日数达 151.9 天 (Wikipedia, 2013)。以 2009 年 1 月 29 日获取的 SAR 影像为基准，则所有影像的基本参数如表 3-1 所示。



图 3-9 实验区示意图

表 3-1 杭州地区 Envisat ASAR Stripmap I2 模式数据参数

序列号	成像日期	轨道	$B_{\perp}/m$	T/d	F_{DC}/Hz	SNR
1	2006-01-05	20133	1175.1	-1120	11.32	19.5
2	2006-02-09	20634	630.9	-1085	5.51	19.5
3	2006-03-16	21135	871.1	-1050	1.15	19.5
4	2006-04-20	21636	-336.7	-1015	3.08	19.5
5	2006-05-25	22137	439.5	-980	-0.43	19.5
6	2006-12-21	25143	585.9	-770	-20.36	19.5
7	2007-03-01	26145	120.5	-700	1.21	19.5
8	2007-05-10	27147	153.3	-630	7.64	19.5
9	2007-08-23	28650	432	-525	10.62	19.5
10	2007-11-01	29652	260.4	-455	4.59	19.5
11	2007-12-06	30153	-126.2	-420	-9.09	19.5
12	2008-02-14	31155	-15.5	-350	1.84	19.5
13	2008-03-20	31656	355.3	-315	6.85	19.5
14	2008-04-24	32157	300.6	-280	5.13	19.5
15	2008-05-29	32658	319.5	-245	6.53	19.5
16	2008-07-03	33159	-37.8	-210	-2	19.5
17	2008-08-07	33660	350.8	-175	3.3	19.5
18	2008-09-11	34161	-47.6	-140	8.56	19.5
19	2008-10-16	34662	165.4	-105	7.04	19.5
20	2008-11-20	35163	-179.4	-70	3.05	19.5
21	2008-12-25	35664	151.3	-35	6.73	19.5
22	2009-01-29	36165	0	0	0	19.5
23	2009-03-05	36666	209.8	35	5.7	19.5
24	2009-04-09	37167	-140.9	70	6.59	19.5
25	2009-05-14	37668	118.4	105	8.59	19.5
26	2009-06-18	38169	-104.4	140	7.89	19.5
27	2009-07-23	38670	285.5	175	-1.73	19.5
28	2009-08-27	39171	390.6	210	15.09	19.5
29	2009-10-01	39672	-218.2	245	6.58	19.5
30	2009-12-10	40674	3.8	315	-2.11	19.5
31	2010-01-14	41175	138.8	350	5.57	19.5

3.3.2 实验结果与讨论

根据 Envisat ASAR 传感器参数, 算得本次所用数据集的 $SNR=19.5$, 空间基线垂直分量临界值 $B_{\perp}^c=1066$ m, 方位向频谱带宽 $B_{az}=1316$ Hz; 并设定该实验区的时间基线临界值 $T^c=1500$ days。然后根据公式(3-12)得到 31×31 大小的相干矩阵, 如图 3-10 (a)所示: 主对角线上元素表示的是 SAR 影像与其自身进行干涉处理, 所以相干性非常高。而所有可能的干涉组合见图 3-10 (b), 根据公式(3-1)计算可知, 共有 930 个干涉组合; 为了更好地比较各种方法之间的效果, 根据统一的标准计算每个干涉像对的相干性测度, 并将其用线条的颜色展示出来。如果就使用这些干涉图用于后续形变反演计算, 不仅计算工作量非常巨大, 大量的低相干的干涉图也会带来大量的噪声, 严重影像最终的反演精度, 这也再次说明了在时间序列 InSAR 处理中有效选取高相干的干涉网络的重要性。

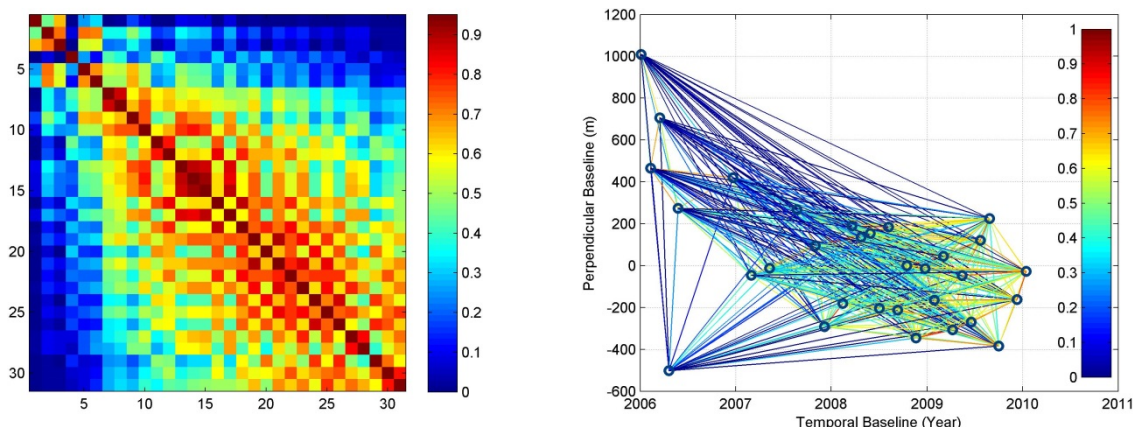


图 3-10 (a) 相干矩阵

(b) 所有可能干涉组合 (930 对干涉对)

单一主影像组合策略具有星状的典型外形, 其干涉网络选取结果如图 3-11 (a)所示, 共选取了 30 对干涉像对。由图可知: 该方法在短时间范围内, 能够选取较高相干性的干涉像对, 但是当时间基线过长 (超过时间基线临界值) 时, 时间去相干的影响就会非常严重 (在此讨论的相干性是从全局空间范围内考虑的, 并不是仅仅局限于数量分布非常有限、但散射特性强而稳定永久散射体)。

在最大时间基线为 900 天, 最大空间基线为 200 m 的约束情况下, 小基线集方法选取得到的干涉网络组合结果如图 3-11 (b)所示, 共选取了 318 条干涉像对。相比较于单一主影像策略, 该方法选取的干涉图的相干性有明显提高, 干涉图的数量也大大增加, 不过计算工作量仍然很大; 部分 SAR 影像的由于与其他影像的空间基线距离过大, 而被分离开来, 个别 SAR 影像甚至没有和任何其他影像组成干涉对; 这违背了干涉组合的第 1 点原则。

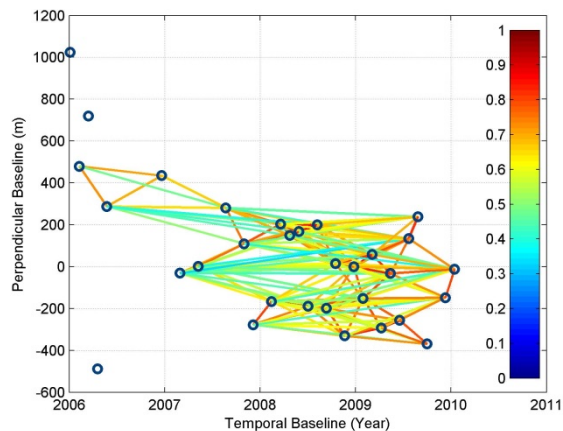
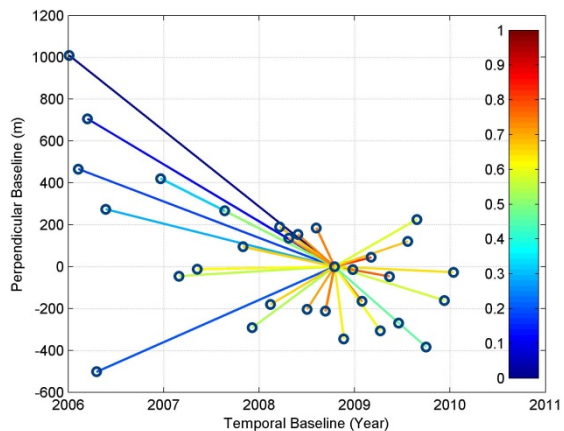


图 3-11 (a) 为单一主影像干涉网络 (PSInSAR)，共选取了 30 对干涉对。(b) 为小基线集干涉网络 (SBAS)，时间基线阈值为 900 天，空间基线阈值为 200 米，最终选取了 318 对干涉像对

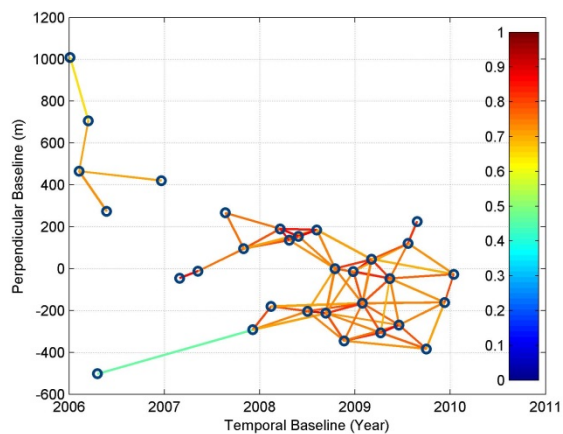
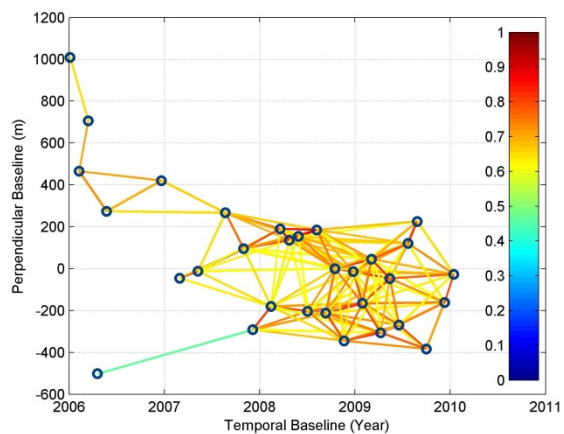


图 3-12 (a) StaMPS/MTI, $\rho_{min}=0.6$, 144 对干涉对

(b) StaMPS/MTI, $\rho_{min}=0.7$, 72 对干涉对

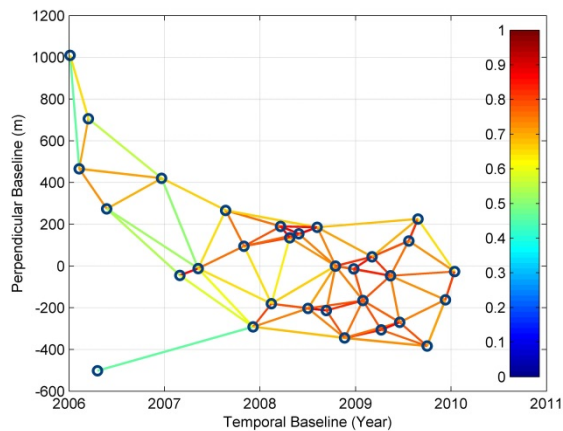
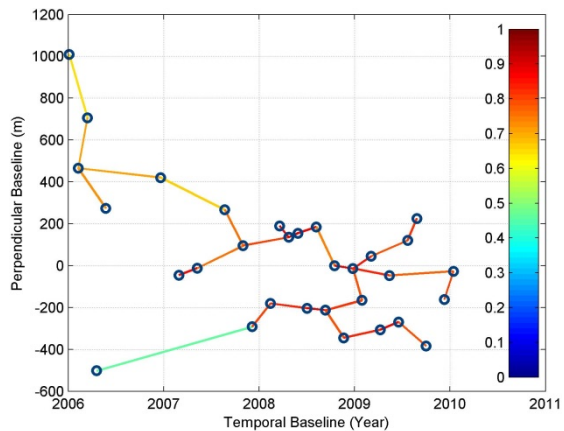


图 3-13 (a) MST, 30 对干涉对

(b) MST+CT+DT, $\rho_{min}=0.75$, 80 对干涉对

StaMPS/MTI 方法的选取结果如图 3-12 所示, 其中, 图(a)为最小相干性阈值设为 0.6 时的选取结果, 共选取了 144 对干涉像对; 图(b)为阈值 0.7 时的运行结果, 共选取了 72 条干涉像对。对比图 3-12 和图 3-11 可知, StaMPS/MTI 方法选取的干涉图相干性更高, 通过设置不同的相干性阈值, 干涉图的数量也能控制在一个可以接受的范围内。但是如 3.1.2 中的论述所言, 该方法无法保证干涉网络的全局连通性, 特别是相干性阈值设置的较高, 比如 0.7 以上时, 因为更少数量的干涉图使得干涉组合构成的集合之间相互独立, 使得后续的全局时间序列形变解算无法完成。

MST 方法有效地解决了全局连通性的问题, 并保证了在最少干涉图前提下, 干涉网络的相干测度的总和最大, 其运行结果如图 3-13 (a) 所示。由图 3-13 (a)和图 3-11 (a)对比可知: 单一主影像方法和 MST 方法均使用最少量的干涉像对连接了所有的 SAR 影像; 但是 MST 方法选取的干涉网络相干性更高。由图 3-13 (a)和图 3-12 比较可知: StaMPS/MTI 方法可能包含了 MST 的选取结果, 但也可能不会包含。

本文提出的将 MST、相干性阈值 (CT)和 Delaunay 三角网阈值法 (DT) 将结合的方法, 在使用和 StaMPS/MTI 方法相同的相干性阈值的条件下, 选取结果如图 3-13 (b) 所示, 该方法总共选取了 80 对干涉像对。由图 3-12 (b)和图 3-13 (b)对比可知: 相比于 StaMPS/MTI 方法, 该方法保证了全局的连通性, 并干涉图的密度均匀, 增加了时空相位解缠的稳健性。

3.4 结论

本章在总结了目前在时间序列 InSAR 的单一主影像和多主影像组合策略中常用的干涉像对的选取方法的基础上, 提出了一种改进的、更加稳健的干涉网络选取方法。该方法根据雷达信号的去相干模型, 建立了以 SNR、垂直空间基线、多普勒质心频率差和时间基线为参数的干涉像对的相干性测度函数模型, 并结合 MST 和 CT 两个连接策略, 得到全局连通、数量适中且相干性高的干涉像对组合网络。根据实际 SAR 数据的测试结果, 验证了该方法比单一主影像和 MST 方法拥有更多的高相干性干涉对, 比小基线集方法计算效率更高, 比 StaMPS/MTI 方法的全局连通性更高, 因此更适用于通用情况下的时间序列 InSAR 数据处理中的干涉像对网络的选取。

从相干性测度函数的推导可知, 多主影像中时间去相干函数并没有被很好地估计, 未来工作将重点放在具有明显季节性变化规律的时间去相干的函数建模中。

第4章 基于分布式目标的自适应空间滤波

在非城市地区，由于强噪声的影响，雷达回波信号的时间和空间去相干效应明显，标准的 PSInSAR (Permanent Scatterers InSAR)难以得到足够数量的相干目标点，以满足稳定的相位解缠的需要。小基线子集方法 (Small BAseline Subset Algorithm, SBAS)利用短时间基线和空间基线的干涉图组合的方法能够在一定程度上减弱时间、空间去相干的影响。但是，在 SBAS 处理中，由于干涉图通过多视处理来降低噪声，导致了空间分辨率的损失和多个目标之间的信号的重叠。本文提出一种改进自适应空间滤波算法，在不降低空间分辨率的情况下，能够更加准确地估计干涉图的干涉相位和相干性。这种方法通过统计学上的拟合优度(Goodness-Of-Fit, GOF) 检验，识别具有相同分布的同质像元 (Statistically Homogenous Pixels, SHP)，利用基于周期图的最大似然方法，估计 SHP 的残余地形坡度，然后对干涉图进行自适应的空间滤波。本文选取了三种常见的 GOF 检验方法，在分析总结各自的优缺点之后，利用黄河三角洲地区的 ALOS PALSAR 数据进行对比测试，实验结果证明了该算法在非城市地区的有效性。

4.1 引言

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是一种利用卫星影像测量大面积地表高程变化的微波遥感技术，它具有毫米级的测量精度(Rosen et al., 2000)。随着星载、机载 SAR 系统的发展和对同一地区的连续观测，利用多时相 InSAR 技术提取长时间序列地形变化成为可能；其中以 PSI(Ferretti et al., 2000; 2001)和 SBAS(Berardino et al., 2002; Mora et al., 2002)最具代表。PSI 方法以一幅 SAR 影像为主影像，其他所有影像为辅影像，生成干涉图，并选取在长时间范围内保持相位稳定的相干目标。这些相位稳定的点，受时间、空间去相干的影响小，被称为永久散射体 (Persistent Scatterers, PSs)。它们在图像上常常对应于分辨单元内的主散射体，主要是由二面角反射和单次强散射形成的强散射目标。在城市地区，人工建筑密集，提供了良好的 PS 点，因此 PSI 方法得到了有效应用(Perissin and Ferretti, 2007)。但是在农田、火山、矿区、蓄水区等非城市地区，地表主要由植被和低散射率的均质物体覆盖，利用 PSI 方法无法提取到足够数量的 PS 点 ($< 10 \text{ PS/km}^2$)，成为 PSI 技术在该地区应用的瓶颈(Ferretti et al., 2011)。因此基于分布式目标 (Distributed Scatterers, DSs, or Gaussian Scatterers)的形变信息提取得到了越来越多的关注。DS 对应于时间序列干涉像对中的中等相干区域，其对应的分辨单元内包含足够数量的小散射体，并服从复数条件下的圆高斯分布(Bamler and Hartl, 1998)。目前已提出 SBAS 和 SqueeSAR(Ferretti et al., 2011)两种方法用于 DS 的处理。

SBAS 方法通过选取具有短时间基线和空间基线的干涉组合,减轻去相干的影响,并对所有的干涉图进行多视处理(Lanari et al., 2007)。这种矩形窗口的多视处理能够增加图像的信噪比,同时也带来了若干问题。(1)分辨率的降低;(2)不同物体的混叠导致了来自不同属性的雷达回波信号的混合;(3)起伏不平的地形和突然的形变变化被平滑,进而产生空间去相干。以上三点均会使得高斯分布的静态任意性前提条件不成立而导致干涉图和相干性的估计偏差(Bamler and Hartl, 1998; Jiang et al., 2013)。对此,新的选择稳定信号的方法被提了出来,并用于地形相位的补偿(Goel and Adam, 2012)。

而 SqueeSAR 利用时间序列 SAR 影像的幅度特征来提取 DSs (自适应的空间滤波),并根据相位三角测量的平差方法,利用所有可能的干涉图的缠绕相位对单一主影像策略下的干涉图的相位进行最优估计(时间域滤波)。然后将 DSs 融入传统的 PSI 处理方法中,和 PSs 一起进行时间序列的形变信息解算。然而,在 SqueeSAR 中使用的 Kolmogorov-Smirnov 检验过于简单,并不适合于具有长尾分布特点的雷达信号;其线性形变模型的假设也并不总是成立,也不适合于具有高度非线性形变的地区。另外,SqueeSAR 中使用的相位三角测量方法所需的计算量很大(Ferretti et al., 2011),这在实际使用中也是需要考虑的重要因素之一。

本章的主要目的是找出适合识别 DSs 的方法,并对其进行有效利用。在具有相似的地球物理性质的地物具有相似的雷达回波信号的前提假设条件下,DSs 在雷达图像上表现为具有统计均质分布的像元,即 SHP (Statistically Homogenous Pixels)。本章的主要安排如下:第二节阐述 SHP 识别的统计理论,对比不同的检测方法,基于此给出相位的自适应空间滤波算法处理流程;第三节展示在黄河三角洲的实际数据的实验结果,并对不同检测方法的结果进行对比分析;最后,对我们的发现进行总结,并对未来的研究计算进行简要说明。

4.2 方法

假设我们经过配准好了的 SAR 影像 N 幅,配准精度达到亚像元级,和单视复数干涉图 M 幅。那么自适应空间滤波的步骤包括如下两步:

4.2.1 SHP 的识别

对于每一个像素,我们希望识别出其周围具有相似统计特征的像元。假设一个在时间上稳定且连续的过程,通过采样,我们获取了 N 个观测样本。根据中心极限定理,分布式目标的雷达回波信号服从未知参数的复数圆高斯分布;因此可以利用统计学上、基于未知参数的拟合优度检验 (Goodness-of-Fit, GOF test),通过检测两个任意的过程是否服从同一个统计分布来识别 SHP。那么这个问题可以定

义为一个零假设(Parizzi and Brcic, 2011):

$$H_0 : F_p = F_q, \text{ 即 } F_p, F_q \text{ 两个分布是同一分布;}$$

$$H_1 : F_p \neq F_q, \text{ 即 } F_p, F_q \text{ 两个分布不是同一分布;}$$

考虑到雷达回波信号分布的不确定性, 我们选择了三种基于 SAR 影像幅度值的统计检验方法: Kolmogorov-Smirnov (KS)检验、Cramer-von Mises (CVM)检验和 Anderson-Darling (AD)检验。它们均属于无参数的统计拟合优度检验, 即被检验的样本不用假设服从某一种特定的概率分布。

A. Kolmogorov-Smirnov Test

Kolmogorov-Smirnov 检验第一个基于通用分布的拟合优度检验方法(Kvam and Vidakovic, 2007; Stephens, 1970)。对于具有相同数量大小的两个样本, 其统计检验量 D_N 定义为两样本累计概率分布函数(cumulative distribution functions, cdfs)的最大垂直距离:

$$D_N = \max_x |\hat{F}_p(x) - \hat{F}_q(x)| \quad (4-1)$$

其中, $\hat{F}_p(x)$ 和 $\hat{F}_q(x)$ 分别是像元 p 和 q 的振幅的经验累积概率分布函数;

零假设 H_0 将会在置信水平 α 上被推翻, 如果统计检验量 D_N 超过 K_α , 其中 K_α 为两样本情况下两端分布的 KS 检验在 $1-\alpha$ 分位点的值(Conover, 1980)。

B. Cramer-von Mises Test

Cramer-von Mises 检验是另一种非参数 GOF 检验(Conover, 1980; Kvam and Vidakovic, 2007)。它利用平方差函数, 测量两个经验累积分布概率函数之间的带权的距离。对于具有相同数量大小的两个样本, 其统计检验量为:

$$\omega_N^2 = \frac{1}{4N^2} \sum_{i=1}^N \{[R_p(i) - 2i]^2 + [R_q(i) - 2i]^2\} \quad (4-2)$$

其中, $R_p(i)$ 和 $R_q(i)$ 分别是像元 p 和 q 在按大小排序的合并样本中, 第 i 小的元素的秩。

当 ω_N^2 大于 $1-\alpha$ 分位点的值 $w_{1-\alpha}$ 时, 零假设 H_0 在 α 置信水平下不成立。其中, 分位点值 $w_{1-\alpha}$ 的渐进分布由 Anderson 和 Darling 给出(Anderson and Darling, 1952), 其在样本数量小于等于 8 时的准确数值由 Burr 给出(Burr, 1963)。

C. Anderson-Darling Test

Anderson-Darling 检验是 CVM 检验的特例，令 CVM 检验的权重函数 $\psi(x) = x^{-1}(1-x)^{-1}$ 即得。与 KS 检验相比，AD 检验在分布的尾部增加了权重，更适合于具有长尾分布特点的雷达回波信号，使得在假设检验时，第二类错误的概率更低(Kvam and Vidakovic, 2007)。其统计检验量为：

$$A_{N,N}^2 = \frac{N}{2} \sum_{x \in \{x_{p,j}, x_{q,j}\}} \frac{(\hat{F}_p(x) - \hat{F}_q(x))^2}{\hat{F}_{pq}(x)(1 - \hat{F}_{pq}(x))} \quad (4-3)$$

其中， $\hat{F}_{pq}(x)$ 是两样本的混合分布的经验累积概率分布函数。与 CVM 相似，当统计检验量 $A_{N,N}^2$ 大于位于 $1-\alpha$ 的分位点值 $A_{\alpha,N,N}^2$ 时，零假设将在 α 置信水平下被推翻。该分位点值在 N 趋近于无穷大时的渐进分布由 Anderson 给出(Anderson and Darling, 1954)，而对于有限数量样本，其分位点值的近似估计由 Pettitt 给出(Pettitt, 1976)。

基于以上阐述了三种 GOF 检验，具有相同统计分布的像元被识别出来，成为 SHP，用于减弱时间去相干的影响。然而，分布式目标的雷达回波信号仍然受到大气延迟相位(Atmospheric Phase Screen, APS)的影响，而 APS 在空间上平滑，且有 1~3 公里的相关长度(Hanssen, 2001)。因此，有必要根据 SAR 影像的空间分辨率，对识别出来的 SHP 的空间范围设置一定的约束限制。

最后 SHP 的识别流程可以总结为：

- 1) 对于每一个像元 P，定义一个中心位于 P 点的估计窗口；
- 2) 对于估计窗口内除 P 点之外的每一个像元，利用两样本的 GOF 检验，判断它们与像元 P 在一定置信水平下是否属于同一分布，将所有与 P 属于同一分布的像元组成为 SHP；
- 3) 提出所有 SHP 中没有与 P 点直接相连或通过其他 SHP 与 P 相连通的像元；
- 4) 将识别的 SHP 与像元 P 绑定，并以 SHP 为处理单元，参与后续的干涉相位的滤波和相干性的估计。

4.2.2 改进的干涉图和相干性估计

根据 2.1 节中 SHP 的识别结果，我们对 M 幅干涉图的干涉相位和相干性进行重新估计。这一步主要通过基于 SHP 的逐像素的自适应空间滤波来实现。由干涉图的计算公式可知：由第 j 幅 SAR 影像 S_j 和第 k 幅 SAR 影像 S_k 组合生成的干涉图在像元 P 的值 $I_{j,k}(P)$ 为(Goel and Adam, 2012):

$$I_{j,k}(P) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{p \in \Omega} S_j(p) \cdot S_k^*(p) \cdot e^{-i\varphi_{ref}} \quad (4-4)$$

其中， $*$ 表示复数共轭； Ω 是 SHP 中所有像元组成的集合， φ_{ref} 是参考相位，包括地形相位、轨道相位等。

像元 P 点对应的相干系数 $r_{j,k}$ 为：

$$r_{j,k}(P) = \frac{\sum_{p \in \Omega} S_j(p) \cdot S_k^*(p) \cdot e^{-i\varphi_{ref}}}{\sqrt{\sum_{p \in \Omega} |S_j(p)|^2 \cdot \sum_{p \in \Omega} |S_k(p)|^2}} \quad (4-5)$$

我们进一步估计像元 P 所对应的 SHP 的协方差矩阵 $C(P)$ ，公式如下(Ferretti et al., 2011):

$$C(P) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{p \in \Omega} d(p) \cdot d^H(p) \quad (4-6)$$

$$d(P) = [d_1(P), d_2(P), \dots, d_N(P)]^T \quad (4-7)$$

其中， H 表示厄尔米特共轭； T 表示矩阵转置； $d(P)$ 是 N 个时相的 SAR 影像在 P 点的复数向量。

对协方差矩阵元素中的振幅进行均一化处理，得到相干矩阵 Γ 。则 Γ 中的非对角线上的元素即为所有可能的干涉组合的干涉图所对应的相干性估计，而其所对应的相位即为自适应滤波后干涉图的干涉相位(Ferretti et al., 2011):

$$\Gamma = \left\{ r_{j,k} \cdot e^{i\varphi_{j,k}} \right\} \quad (4-8)$$

4.3 实验区概况与数据

为了评价新算法的改进之处，我们选取位于中国山东省东北部的黄河三角洲作为实验区。黄河三角洲湿地是世界少有的河口湿地生态系统，位于山东省东北部的渤海之滨，地理坐标为东经 118°33′~119°20′，北纬 37°35′~38°12′之间，包括黄河入海口和 1976 年以前引洪的黄河故道，总面积 15.3 万公顷 (如图 4-5a 所示)。黄河三角洲上河流纵横交错，形成明显的网状结构，各种湿地景观成斑块状分布，如图 4-1 所示。在湿地存在形态上，黄河三角洲湿地以常年积水湿地为主，占总面积的 63%；季节性积水湿地占湿地总面积的 37%。自然保护区的土地资源是黄河近百年来携带大量泥沙填充渤海凹陷成陆的海相沉积平原，地势平坦宽广，海拔高程为 0~5m，平均高程坡度为 1/8000~1/12000。气候为暖温带季风型大陆性气候，在研究区 5 月-10 月为植被长叶季节，11 月-4 月是落叶季节(Xie et al., 2013)。

我们获取了该地区 2007 年 6 月至 2009 年 10 月的 ALOS PALSAR 的 L 波段 SAR 数据共 13 景，入射角为 38.73°，HH 极化。其 L 波段波长为 23.6 cm，比 X 波段和 C 波段的波长都长，因此其穿透深度更大，在非城市地区具有明显的优势。该影像的距离向分辨率为 9.39 m，方位向分辨率为 3.14 m。

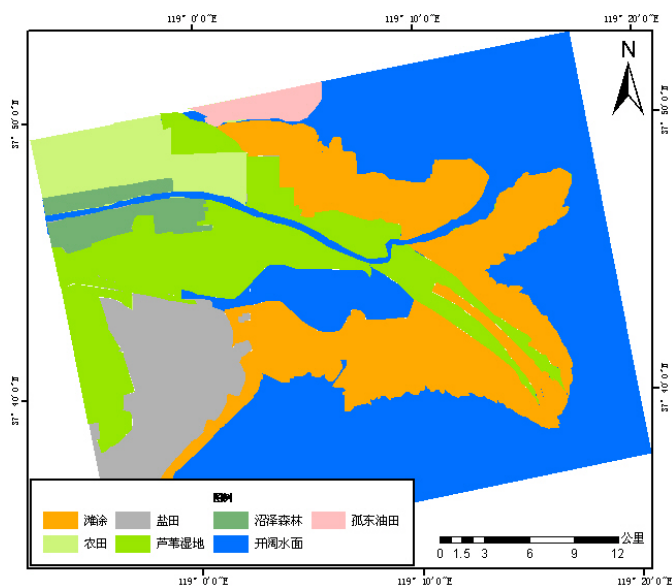


图 4-1 黄河三角洲地物分布情况(Xie et al., 2013)

4.4 实验结果与讨论

该数据集的预处理利用 Gamma 软件完成，而本文所提出的算法均在 Matlab 环境下编写。图 4-2 展示了 SHP 的识别结果。其中绿色圆点为原始像元，红色圆点表示其对应的 SHP；而(b-d)分别表示根据公式(4-1)、(4-2)、(4-3)的识别结果。对于一个 23×23 大小的搜索窗口，KS 检验和 CVM 检验均选取了 106 像元，而 AD 检验选取了 105 个。由图可知：所有的识别出来的 SHP 均覆盖在同一片水稻田中，且不同的统计检验方法之间，识别结果没有明显差异。

基于两种不同类型的地物的 SHP 的相干矩阵结果如图 4-3 所示，其计算公式如(4-6)、(4-7)、(4-8)。它表达了所有可能的 SAR 影像组合。与水稻田相比，土质田埂明显具有更高的相干性，且相干性随时间变化，但并不是严格的炎性变化关系，而呈现出由于耕种和灌水而引起的季节性变化规律。这个矩阵对于干涉网络的组合优化选取具有很好的借鉴意义。

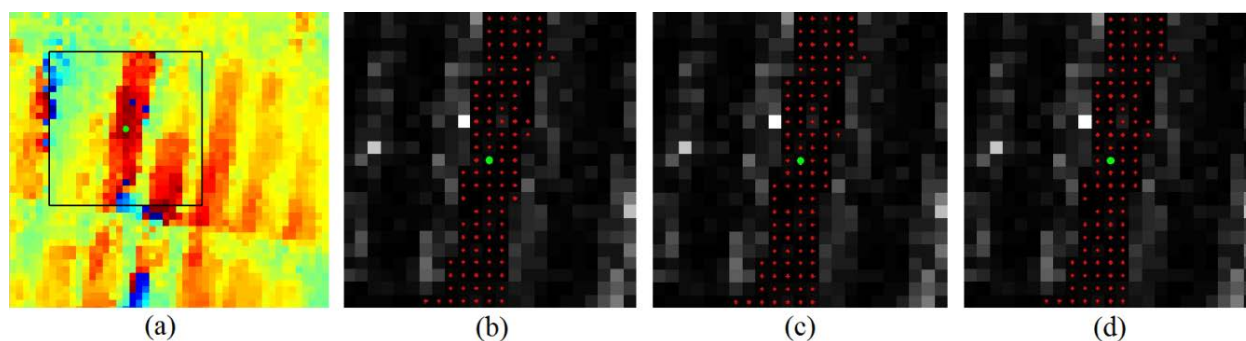


图 4-2 SHP 的识别结果

((a)是经过 1×3 多视处理后的原始干涉图，其中黑色方框表示搜索框的范围，绿色圆点表示中心像素；(b-d)分别为 KS、CVM 和 AD 检验的识别结果，其中底图为 SAR 影像振幅，红色圆点表示识别出来的 SHP，绿色圆点表示中心像素)

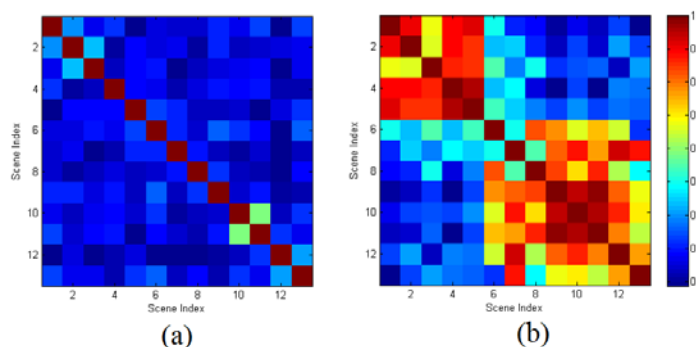


图 4-3 不同地物的 SHP 的相干矩阵对比

(横轴和纵轴均表示 SAR 影像的序列号，(a)为水稻田，(b)为水稻田之间的道路或田埂。相较于水稻田，田埂明显具有更高的相干性，且其相干性并不是随着时间有线性变化规律，而呈现出一定的季节性变化)

为了检验算法的有效性，一个包含水稻田和人工建筑的局部区域被挑选出来。根据(4-4)、(4-5)，对该区域进行自适应的空间滤波，并与传统的 boxcar 滤波方法得到的结果进行比较，如图 4-4 所示。其中，图(a)分别为该区域的 Landsat TM 影像和经过 1×3 多视处理后的由 2013 年 8 月 13 日和 2013 年 9 月 28 日影像生成的干涉图。由于在两次观测期间，有一次从黄河抽取来浇灌水稻田的灌水，导致水稻田中南北两端的水位有高差，并在图中表现为单个水稻田内沿方位向上的干涉条纹。(b)图是用传统的 boxcar 方法滤波后得到的相干图和干涉相位；(c)图是利用本文中基于 AD 检验的自适应滤波方法得到的相干图和干涉相位。由图可知：相较于 boxcar 方法，本文的自适应滤波方法能够有效区分水稻田和稻田之间的田埂，建筑物以及与其相连的道路的外形轮廓也被清晰地保留了下来，说明该方法能够有效保持目标分辨率。

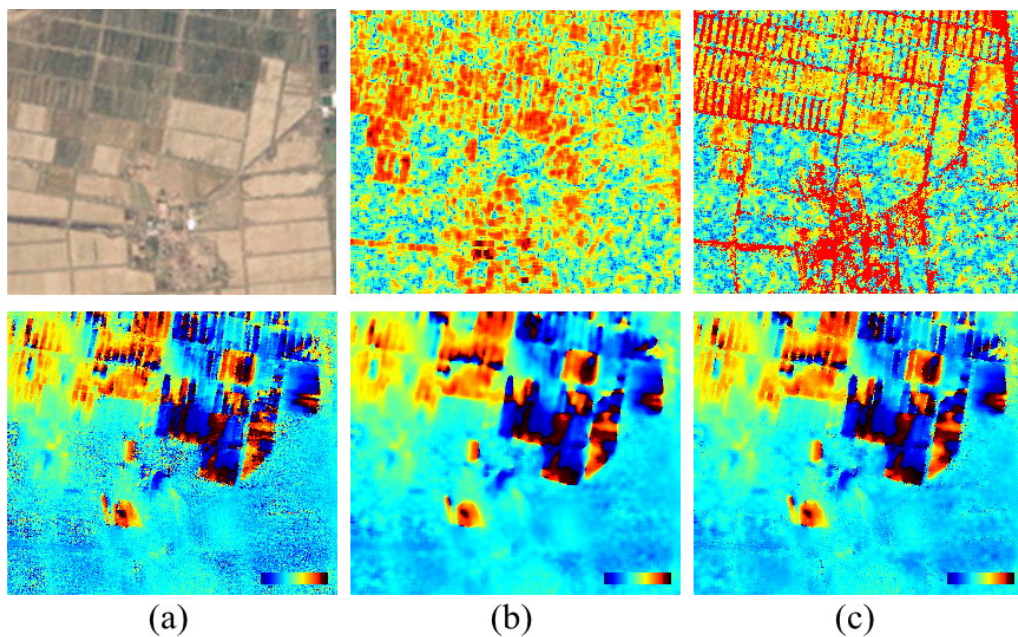


图 4-4 滤波结果对比

((a)分别为 Landsat TM 影像和经过 1×3 多视处理后的原始干涉相位；(b)分别为经过 boxcar 滤波后的相干图和干涉相位；(c)为经过基于 AD 检验的自适应滤波后的相干图和干涉相位。其中，水稻田内部的干涉条纹是由人工灌水引起的。)

整幅影像的处理结果如图 4-5、图 4-6 所示。3,114,121 个像素能够识别出有效的 SHP，占整幅影像所含像素数的 92.68%。图 4-5a 是整个实验区对应的 Landsat TM 影像；b 为利用本文方法处理后重新估计的相干系数分布图，整景影像的平均相干系数为 0.2805，高于经过 boxcar 滤波后得到的相干图相干系数幅度值的平均值 0.2676。图 4-6a 为原始的干涉图，其已去除了地形相位的影响；b 图即为以 a 图为基础，经过自适应滤波后的干涉相位。由于该算法是逐像素的滤波操作，其计算效率随着搜索窗口的增加会有显著的增加；且会因为滤波的影响而降低一定的空间分辨率，但是目标分辨率并没有损失。



图 4-5 (a)Landsat TM 影像, (b)经过基于 AD 检验的自适应滤波后的相干图

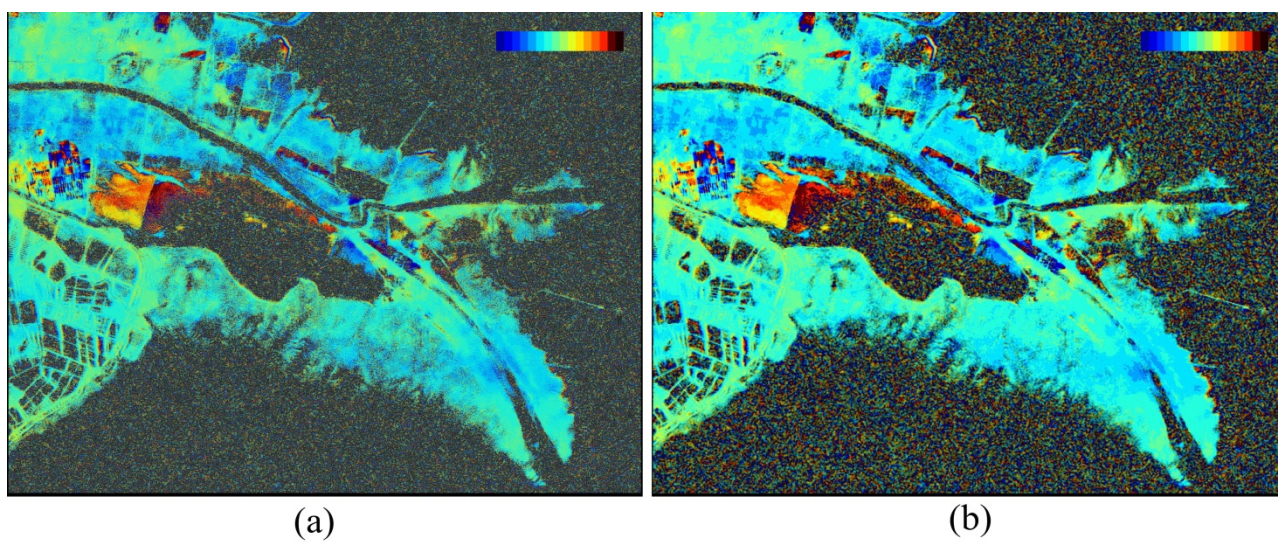


图 4-6 (a)原始干涉相位, (b)经过基于 AD 检验的自适应滤波后的干涉相位

4.5 结论

本章在分析了非城市地区的 InSAR 应用局限性的基础上, 根据统计学意义上的拟合优度检验, 提出了一个面向分布式目标的自适应空间滤波算法。并利用真实 SAR 数据, 对比分析了三种不同的假设检验的识别结果。通过与传统的 boxcar 滤波结果的对比, 证明了新方法能够有效提高干涉相位和相干性的估计准确性, 并有效保留地物的细节信息, 增加实验区的相干性。

第5章 基于时间序列InSAR的杭州海塘形变分析

本章利用杭州地区 2006~2010 年获取的 31 景 Envisat-ASAR 影像, 根据 MTInSAR (Multi-Temporal InSAR)方法, 综合提取 PS (Persistent Scatterer)和 DS (Distributed Scatterer)点, 得到密集的钱塘江海塘形变的 InSAR 测量结果。与 28 个点的水准数据对比表明, 两者的平均误差为 0.436 mm, 最大误差为 5.016 mm, 验证了 InSAR 技术毫米级的测量精度和准确性。通过这两种数据的时间序列分析发现, 海塘的沉降在空间上具有连续性, 其空间分布呈现为单峰下沉曲线; 在时间上, 则具有明显的线性变化规律, 并伴随有短时间范围的小幅度波动。

5.1 实验区背景

5.1.1 杭州地区概况

杭州位于中国东南沿海、浙江省背部, 地处长江三角洲南翼, 钱塘江下游, 杭州湾西部, 是京杭大运河的南端。其市区面积为 3068 平方公里, 2012 年常住人口达 880.2 万(杭州统计信息网, 2013)。在地质构造格局上, 杭州位于扬子板块的东缘, 江山-绍兴断裂带的西侧, 余杭-嘉兴台陷的西南段, 其周边低山丘陵部分跨入了钱塘台褶带东北端, 该区先后经历了神功期、晋宁期、加里东期、印支期、燕山期和喜马拉雅期的构造运动(丁伯阳 et al., 2003)。市区地貌类型多样, 地势由西南向东北倾斜。其西北部和西部为天目山系余脉, 南部为龙门山系余脉; 市区主体隶属浙江平原区。

自 1964 年以来, 由于地下水的过度开采, 以嘉兴市为中心的杭嘉湖平原超过 70%面积的地区发生了地面沉降, 中心累计最大沉降量达 1.1 米; 该沉降带与上海沉降带、苏州-无锡-常州沉降带连在一起, 形成了中国面积最大的地面沉降地区之一; 而杭州位于整个长三角大沉降带的西南端。

5.1.2 钱塘江海塘概况

钱塘江发源于安徽省休宁县境内, 在杭州湾湾口断面注入东海, 全长 668 公里, 流域面积 5.56 万平方公里。钱塘江河口分为三段: 从富春江电站至杭州市东江嘴与浦阳江汇合处, 河长 75 公里, 为近口段, 以河川径流作用为主; 东江嘴以下至海盐澉浦与余姚西三闸连线断面, 河长 122 公里, 为河口段, 为径流与潮流消长变化、共同作用; 澉浦以下为杭州湾潮流段, 至湾口断面注入东海, 湾长 85 公里, 以潮流作用为主(钱管局勘设院, 2012)。钱塘江海塘位于河口段和杭州湾潮流短。

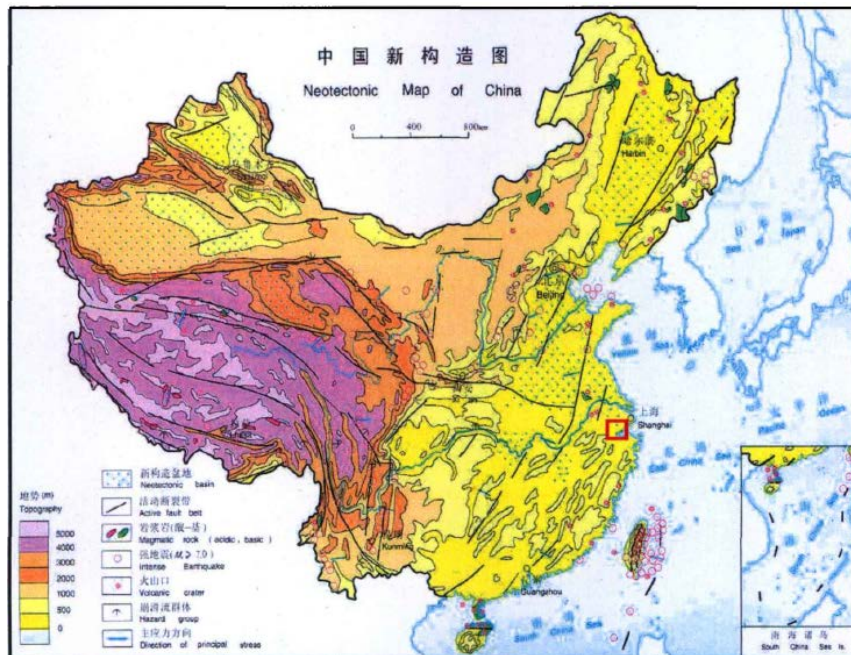


图 5-1 杭州区域构造位置图 (邓起东 and 张培震, 2002)

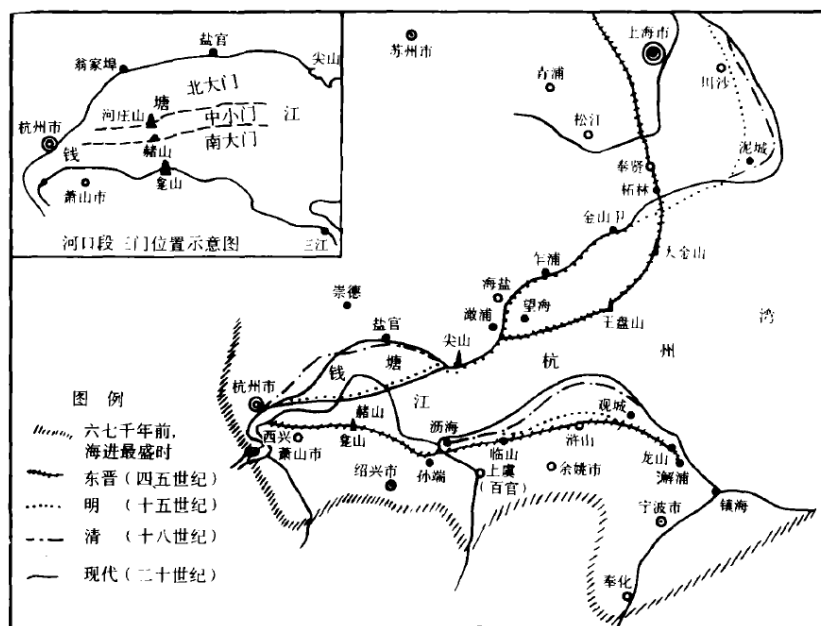


图 5-2 钱塘江河口岸线变迁示意图 (陶存焕 and 戴泽衡, 1997)

杭州海塘历史悠久，钱塘江南两岸分布的海塘，从东汉时期开始，历经唐代、五代钱氏捍海塘、北宋海塘、南宋海塘、明代海塘、清代海塘至今。目前存留下来的海塘主要为明清两代和近当代修建。其中，清代的鱼鳞大石塘以规模宏大，结构精良闻名于世，直至上世纪 80 年代依然发挥着防御洪潮作用(陶存焕 and 戴泽衡, 1997)。近代以来，除抗日战争时期，杭州海塘的修筑一直在进行。上世界 60 年代至 80 年代，沿江各县结合治江围涂，兴建了围堤，使得部分老海塘退居二、三线，目前仍临江的老

海塘堤长 79 公里，主要位于萧山区临浦镇沿江堤段(陈希海 and 周素芳, 1999)。1996 年至 2004 年底，杭州市基本完成了钱塘江标准堤塘工程的建设，建成标准堤塘 172.4 公里，其中北岸 65.6 公里，南岸 106.8 公里，主要包括西湖区南北大塘、主城区海塘、三堡至下沙海塘、滨江区标准堤塘、萧山区标准堤塘、省管海塘等。

本次试验范围为东西向的矩形区域，东西长 82 km，南北长 60 km ($30^{\circ}03'30''\text{N}\sim 30^{\circ}25'00''\text{N}$, $120^{\circ}04'00''\text{E}\sim 120^{\circ}47'30''\text{E}$)，覆盖的海塘总长度约为 268 km。研究对象为一线临江海塘，明清时期的二、三线古海塘不在本章讨论范围之内。本章利用 PS 和 SBAS 各自的技术优势，分别选取在长时间范围内相位保持稳定的相干目标点，然后将两种方法的提取结果进行融合，用于后续的相位解缠，DEM 残差、轨道误差和大气相位估计，得到该地区的形变结果。将 InSAR 测量结果导入 Google Earth，进行空间分析判断，并与实地的水准测量结果进行对比验证，分析海塘形变的时间变化规律。

5.2 数据

5.2.1 SAR数据

实验区数据分布情况如图 5-3 所示，共获取欧空局提供的杭州地区 Envisat ASAR Stripmap I2 成像模式 SAR 影像 31 景(重访周期 35 d, C 波段，波长为 5.6 cm，图 5-3 白色方框表示覆盖范围)，时间跨度为 2006 年 1 月到 2010 年 1 月，最小时间分辨率为 35 天，空间分辨率为 30 m，入射角变化范围为 22.8° ，上升轨道，极化方式为 VV (垂直极化)。31 景 SAR 数据组成的影像立方体如图 5-11 所示；其他参数见表 5-1。



图 5-3 实验区的地理位置和 SAR 影像的振幅均值图

(左边底图为微软必应的航拍像片，白色矩形表示 31 景 ASAR 影像的覆盖范围，黄色矩形表示实验区范围，红色线条为水准线的位置分布；右边为 31 景 SAR 影像的振幅均值图。)

表 5-1 杭州地区 Envisat ASAR 参数列表

序列号	成像日期	轨道	$B_{\perp}/m$	T/d	F_{DC}/Hz	SNR
1	2006-01-05	20133	1175.1	-1120	11.32	19.5
2	2006-02-09	20634	630.9	-1085	5.51	19.5
3	2006-03-16	21135	871.1	-1050	1.15	19.5
4	2006-04-20	21636	-336.7	-1015	3.08	19.5
5	2006-05-25	22137	439.5	-980	-0.43	19.5
6	2006-12-21	25143	585.9	-770	-20.36	19.5
7	2007-03-01	26145	120.5	-700	1.21	19.5
8	2007-05-10	27147	153.3	-630	7.64	19.5
9	2007-08-23	28650	432	-525	10.62	19.5
10	2007-11-01	29652	260.4	-455	4.59	19.5
11	2007-12-06	30153	-126.2	-420	-9.09	19.5
12	2008-02-14	31155	-15.5	-350	1.84	19.5
13	2008-03-20	31656	355.3	-315	6.85	19.5
14	2008-04-24	32157	300.6	-280	5.13	19.5
15	2008-05-29	32658	319.5	-245	6.53	19.5
16	2008-07-03	33159	-37.8	-210	-2	19.5
17	2008-08-07	33660	350.8	-175	3.3	19.5
18	2008-09-11	34161	-47.6	-140	8.56	19.5
19	2008-10-16	34662	165.4	-105	7.04	19.5
20	2008-11-20	35163	-179.4	-70	3.05	19.5
21	2008-12-25	35664	151.3	-35	6.73	19.5
22	2009-01-29	36165	0	0	0	19.5
23	2009-03-05	36666	209.8	35	5.7	19.5
24	2009-04-09	37167	-140.9	70	6.59	19.5
25	2009-05-14	37668	118.4	105	8.59	19.5
26	2009-06-18	38169	-104.4	140	7.89	19.5
27	2009-07-23	38670	285.5	175	-1.73	19.5
28	2009-08-27	39171	390.6	210	15.09	19.5
29	2009-10-01	39672	-218.2	245	6.58	19.5
30	2009-12-10	40674	3.8	315	-2.11	19.5
31	2010-01-14	41175	138.8	350	5.57	19.5

5.2.2 DEM

获取了中国科学院计算机网络信息中心 地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>)提供的 SRTM3 DEM 数据，空间分辨率 90 米，DEM 成像时间为 2000 年。

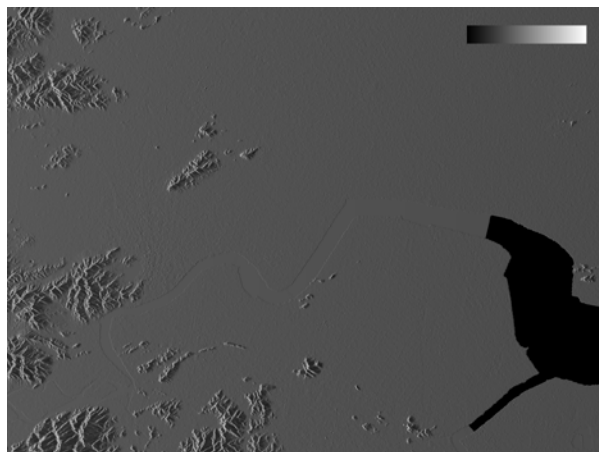


图 5-4 由 DEM 生成的幅度模拟图

5.2.3 气象数据

获取了由中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>)提供杭州台站从 2003 年 1 月 1 日至 2011 年 1 月 1 日的 6 小时分辨率的历史气象数据，包括降水量、平均温度、相对湿度等。

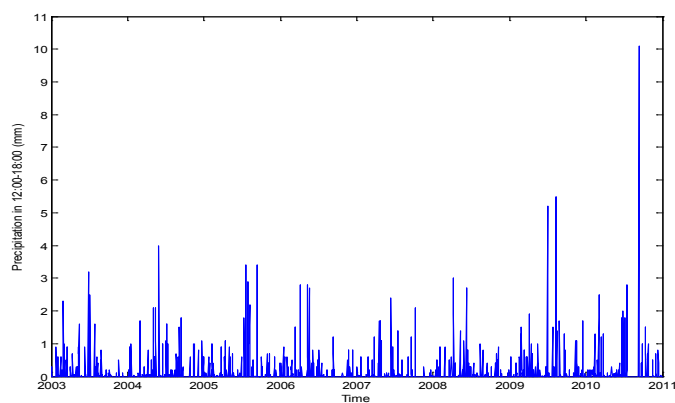


图 5-5 杭州台站 2003-2010 年降水量

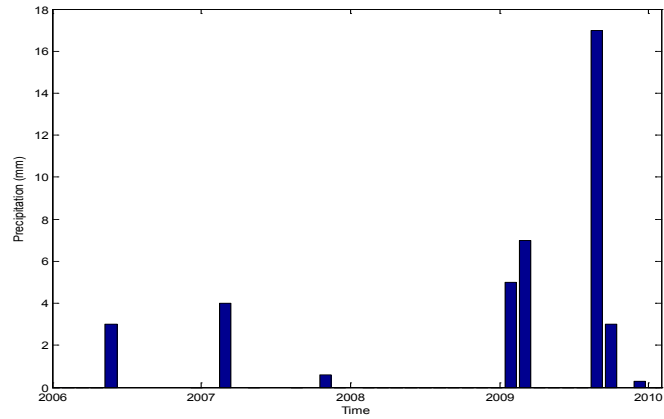


图 5-6 31 景 SAR 影像成像时间的 6 小时降水量

5.2.4 水准测量数据

收集了由浙江省水利河口研究院提供的钱塘江河口的四等水准数据两条，共 136 个测量点；时间范围为 2009 年 8 月至 2012 年 11 月，共 12 期。该水准线分布于钱塘江杭州段南北两岸，其北岸测量线共一段，南岸测量线分为 3 段，地理位置如图 5-7 中红线所示，各段的起止点如下：

南岸上游段：临浦茅山闸 → 闻堰龙山化工厂沿线海塘

南岸中游段：钱江四桥 → 射潮广场

南岸下游段：西兴码头 → 七甲上游 & 九上顺坝 → 乌龟山沿线海塘

北岸段：珊瑚河闸 → 七格沿线海塘



图 5-7 水准线位置示意图

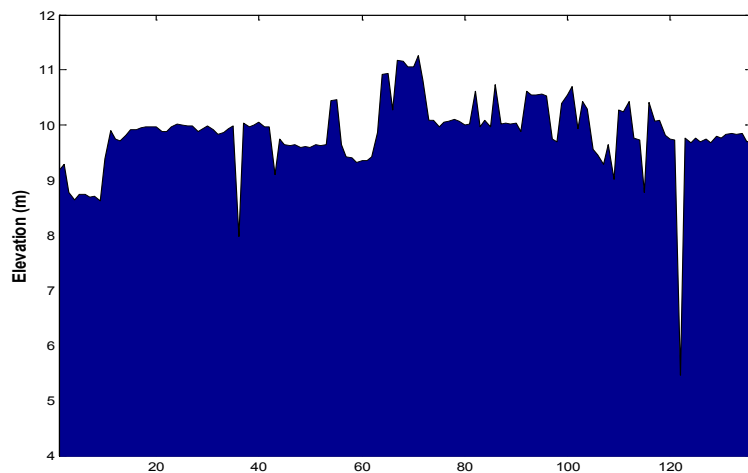


图 5-8 水准点高程剖面图

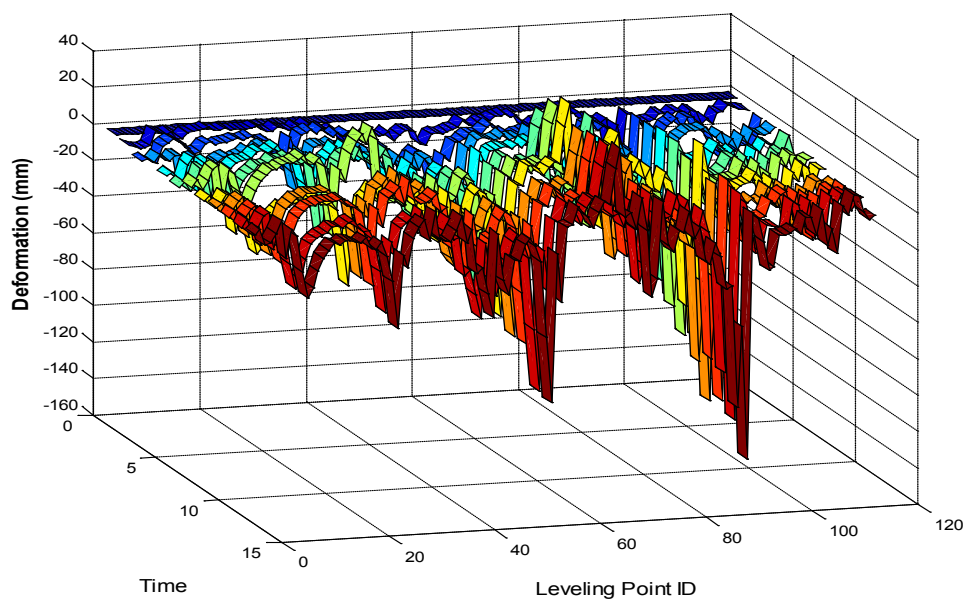


图 5-9 水准点高程变化图

(以 2009 年 8 月采集的第 1 期水准数据，图中蓝色带为参考。从蓝色过渡到红色依次表示时间的更替)

以 2009 年 8 月采集的第 1 期水准数据为基准，将其他所有时期数据测得的水准点的形变展示如图 5-9 所示。后续测量中，由于部分水准点被破坏，因此无法测度时间序列的形变结果；将这些点剔除，得到 118 个水准点的高程随时间变化。可以看出，部分水准点有较大形变，其中沉降最大的 SC41 号点，在 4 年间 (2009 年 8 月-2012 年 11 月) 的累计沉降量达 14.3 cm。

5.3 InSAR数据处理

本文采用的 InSAR 处理流程如图 5-10 所示

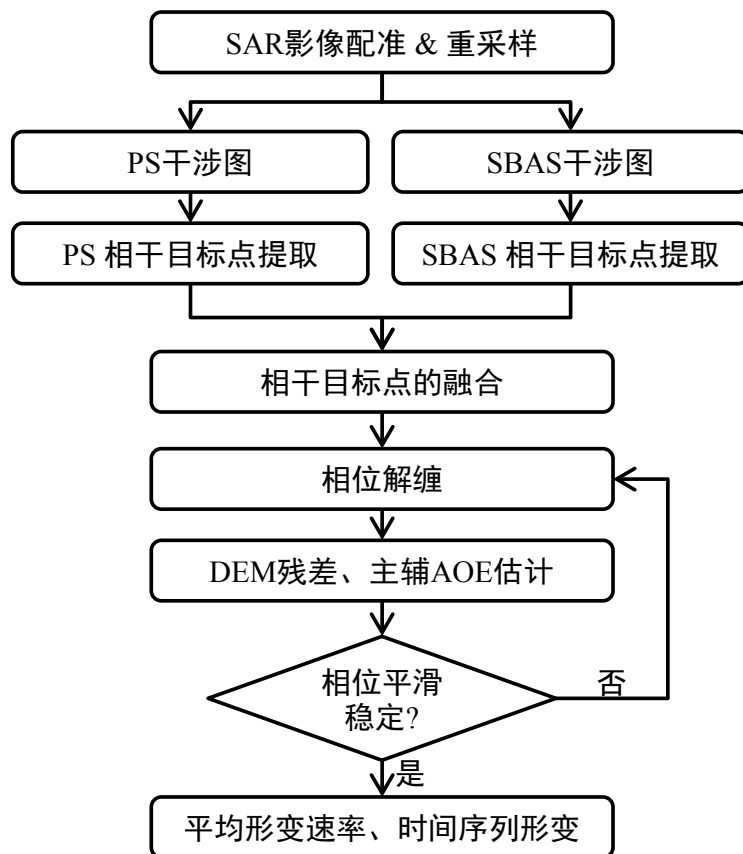


图 5-10 时序 InSAR 处理流程图

5.3.1 SAR 影像配准

以 2009 年 1 月 29 日获取的 SAR 影像为主影像，其他所有影像为辅影像，对其进行基于 DEM 的多时相数据配准。其中，考虑到不同基线下，成像几何的差异和去相干的影像，设定 300 m 的空间基线阈值，与主影像空间基线小于 300 m 的辅影像直接与主影像进行基于过采样方法的配准；余下的 SAR 影像，则选取与其空间基线最小的 3 幅 SAR 影像进行像对配准。最后通过网络解算，得到所有辅影像相对于主影像的重采样参数(Hooper, 2006)。该过程通过 StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers)软件调用 Doris (Delft object-oriented radar interferometric software)来完成。配准、重采样后的 31 景 SAR 数据组成的影像立方体如图 5-11 所示。

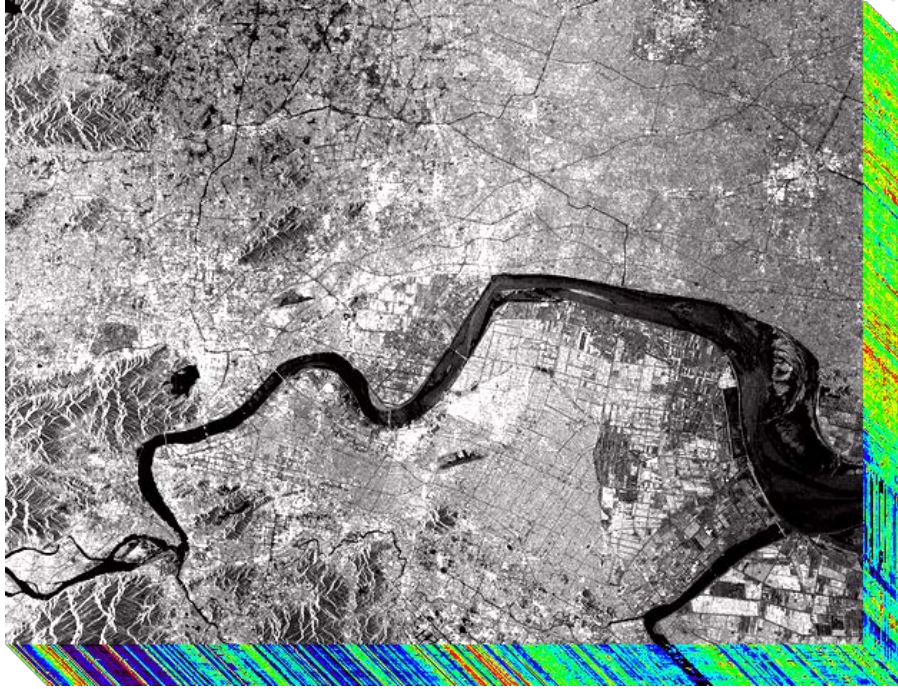


图 5-11 31 景 SAR 振幅影像立方体 (顶层为 2009 年 1 月 29 日影像)

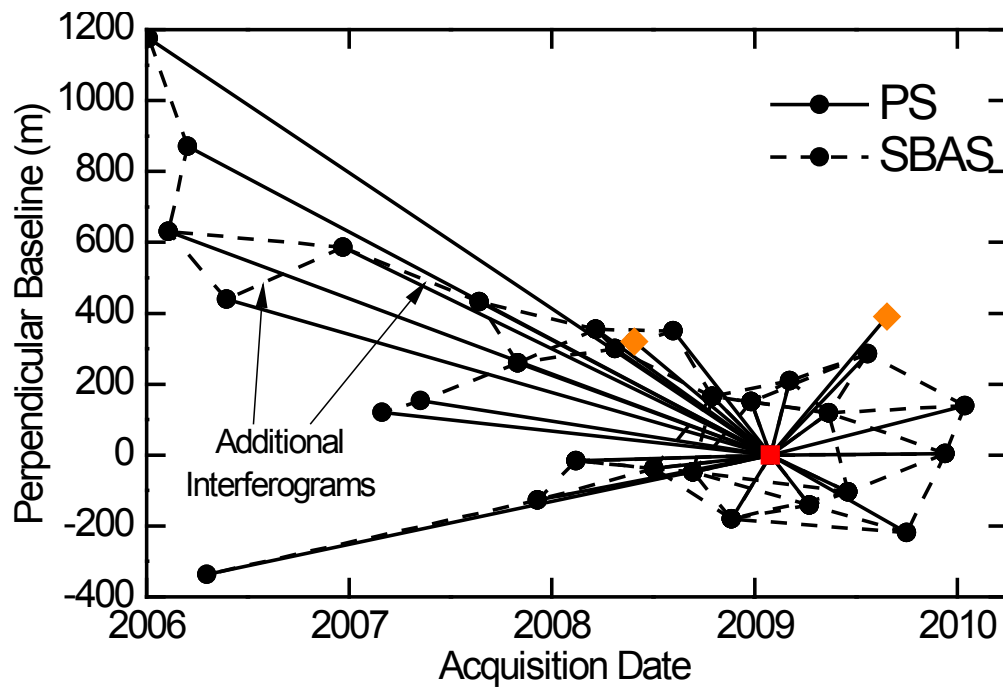
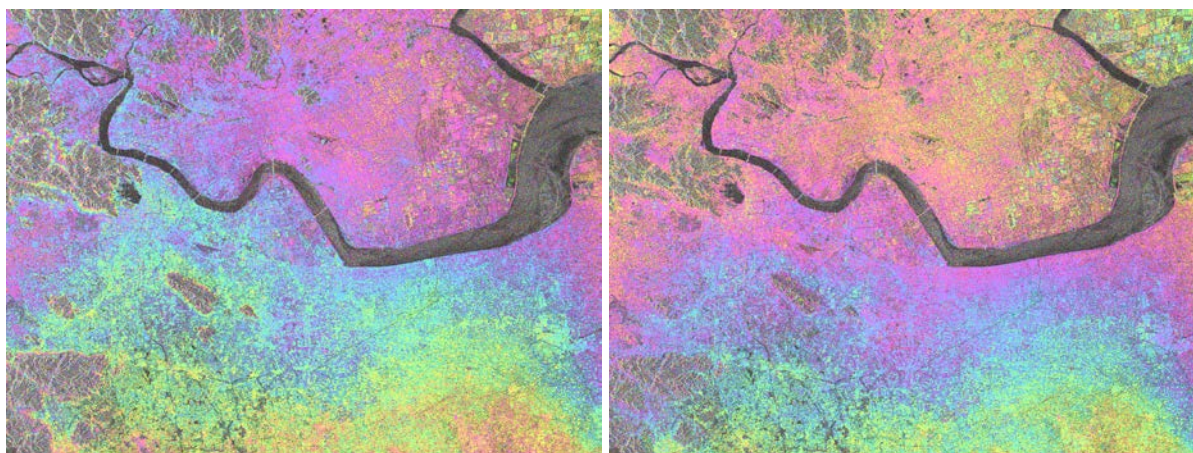


图 5-12 干涉网络组合

(圆点表示 SAR 影像，实线表示 PSInSAR 干涉图，虚线表示 SBAS 干涉图。红色点标记的 2009 年 1 月 29 日影像为配准的参考影像，也是 PSInSAR 中的主影像。橙色点标记的 2008 年 5 月 29 日和 2009 年 8 月 27 日影像在 SBAS 处理中因严重的大气相位被剔除。)

5.3.2 干涉图生成

根据第 3 章所述方法, 生成 SBAS 的干涉图, 其中相干性阈值设为 0.75, 垂直空间基线阈值为 1106 m, 时间基线阈值为 1500 天。另外, 2008 年 5 月 29 日和 2009 年 8 月 27 日获取的影像由于强降雨的影响, 致使其对应的干涉图中出现严重的不规则大气相位, 予以剔除 (图 5-12 中橙色菱形点)。最终 SBAS 方法生成干涉图 63 幅, 组合情况如图 3 中虚线所示。另外, PSInSAR 方法生成干涉图 30 幅, 两种方法选取结果重叠 14 幅, 最终得到总的干涉图 79 幅。根据上述的组合, 将两景 SAR 影像共轭相乘得到干涉图, 根据卫星轨道参数, 计算得到平地相位并予以去除, 结果如下图(a)所示。根据获取的 DEM, 计算得到地形相位, 并予以去除, 得到差分干涉图, 结果如下图(b)所示。



(a) 图 5-13 干涉图(2009 年 1 月 29 日 – 2009 年 3 月 5 日) (b)

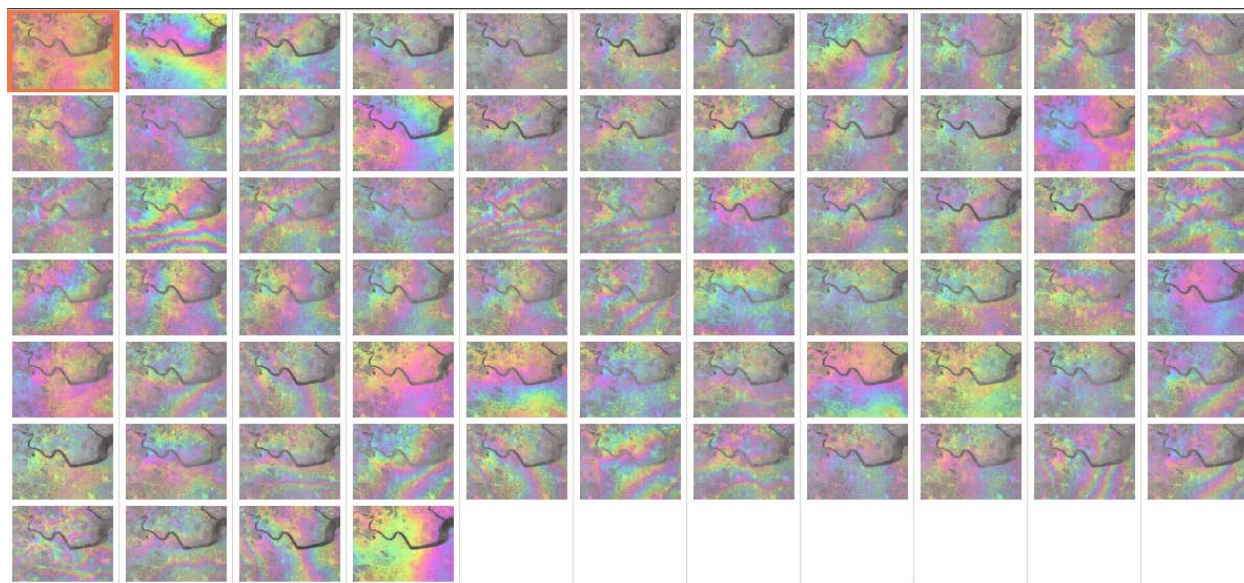


图 5-14 SBAS 干涉图 (包括因水汽影响剔除的 7 幅干涉图)

5.3.3 相干目标点的提取

该过程如图 5-10 中处理流程所示，分别用 PSInSAR 方法和 SBAS 方法对两者生成的干涉图进行相干目标点的候选点识别、噪声评价，相干目标点的识别、提纯等(Hooper et al., 2004)；最后根据地理位置，将两种方法的提取结果进行融合(Hooper, 2008)。

5.3.4 相位解缠

根据 Hooper 提出的三维相位解算算法和 SNAPHU 软件(Chen, 2001; Hooper and Zebker, 2007)，对所有相干目标点的干涉相位进行解缠，结果如下图。

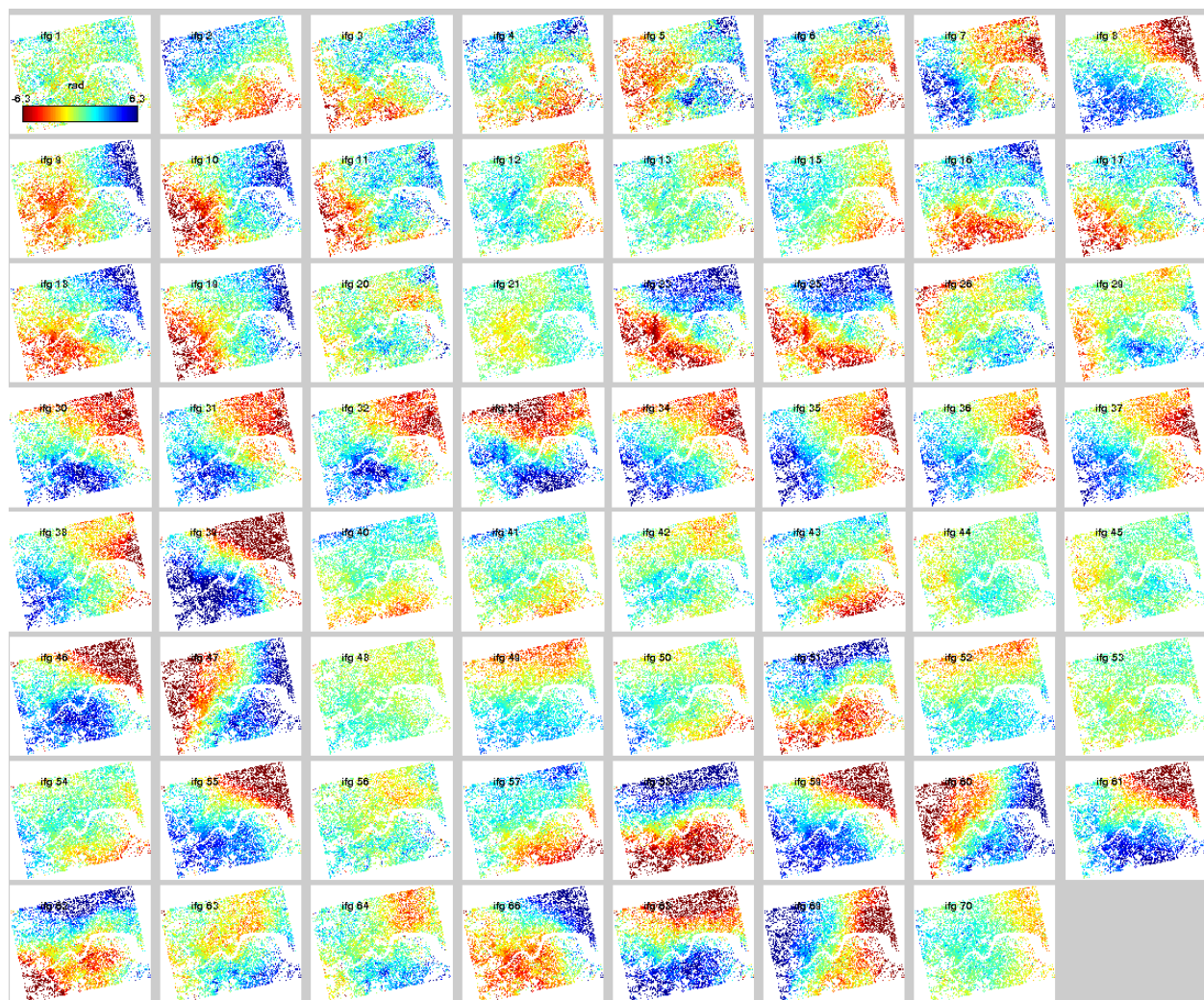


图 5-15 小基线集干涉图解缠后相位

5.3.5 AOE、DEM残差估计

由公式(2-13)可知：解缠后相位 $\Delta\varphi$ 是若干成分相位的叠加，主要包括地表形变相位 φ_{def} ，由于外部 DEM 数据的不准确导致的 DEM 残差相位 φ_{topo_e} ，在去平地相位过程中由于不精确的卫星轨道参数引入的轨道相位误差相位 φ_{orb} ，主辅影像的大气延迟相位 φ_{atmos} ，以及噪声相位 φ_{noise} ，其关系表示如下：

$$\Delta\varphi = \varphi_{def} + \varphi_{topo_e} + \varphi_{orb} + \varphi_{atmos} + \varphi_{noise} \quad (5-1)$$

噪声相位 φ_{noise} 是随机信号，可通过多视处理去除。

大气相位 φ_{atmos} 在时间序列上是随机的，为高频信号；在空间分布上是平滑的，为低频信号 (严重不规则大气相位在空间上可能不平滑，这已通过外部气象数据筛选剔除，见 5.3.2 节)；而非线性形变相位在时间序列上是低频信号。因此可以通过空间域的高通滤波和时间域的低通滤波，减弱大气相位的影响；结果如图 5-17 (a)。

卫星轨道误差相位 φ_{orb} 会在干涉图中产生全局分布的线性相位，可通过选取已知的没有形变的地区的相位来估计；也可以在非全局形变的假设条件下，根据全局的相位变化进行估计；结果如图 5-16。

DEM 残差相位 φ_{topo_e} 计算公式如下：

$$\varphi_{topo_e} = -\frac{4\pi B_{\perp}}{\lambda R \sin \theta} \varepsilon \quad (5-2)$$

其中， ε 为残余地形相位高程，是固定值；由此可知： φ_{topo_e} 与垂直空间基线 $B_{\perp}$ 成正比，在线性形变的前提估计下，两者通过最优化方法一起迭代估计； φ_{topo_e} 的估计结果如图 5-17(b)所示。

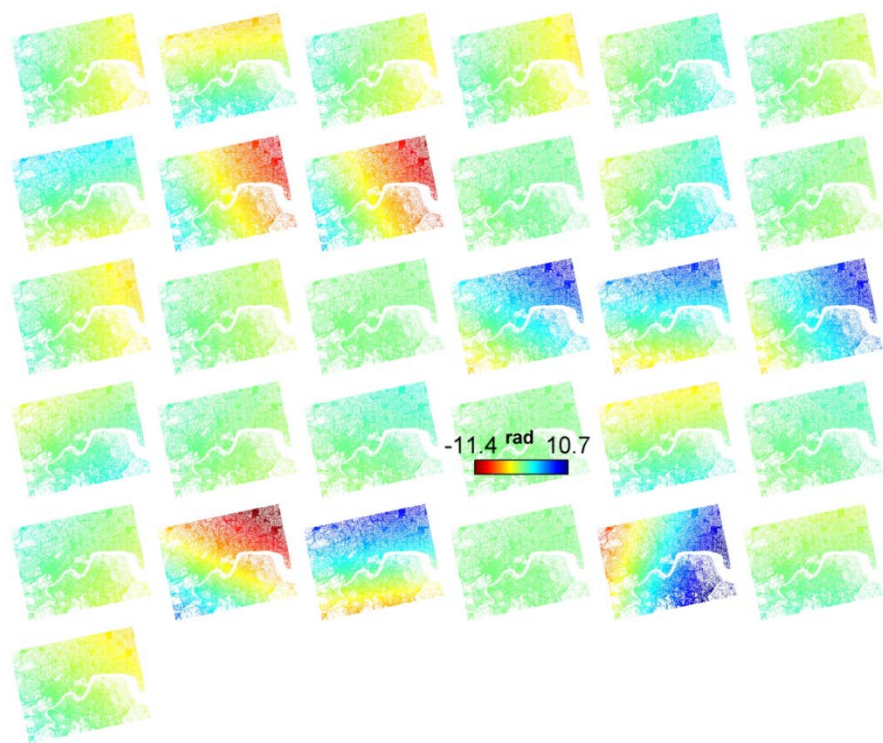
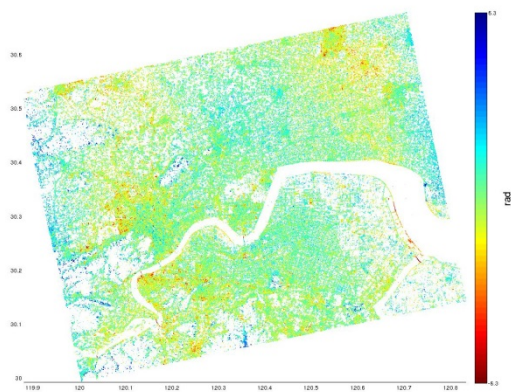


图 5-16 轨道误差估计相位 (相对于主影像)



(a)

图 5-17 (a)主影像的大气误差相位和轨道误差相位, (b)DEM 残差相位



(b)

5.3 结果与讨论

5.3.1 InSAR结果

根据上面所述的处理方法，由 79 幅干涉图计算得到杭州地区 2006 年 1 月至 2010 年 1 月间的地表形变的 InSAR 测量结果。在 4970 平方公里的实验区内，总共提取到了相干目标点 564,467 个，测量点的空间平均分布密度为 113.6 个每平方公里；仅仅使用 PS 方法提取的相干点数量为 337,884，它们更集中分布于高楼林立的闹市区，在郊区和海塘周边分布较少。相比之下，本文方法在海塘、农作物等地物分布的非典型城区有效增加了测量点数量，提升了测量点空间密度。实验区 LOS (Line Of Sight) 方向上的平均形变速率分布如图 5-18 所示，变化范围为-27.7~11.4 mm/yr，反演精度中误差在 0.9~11.4 mm/yr 之间；其中，包括杭州市市区在内的大部分地区的反演中误差均在 1.5 mm/yr 左右，说明反演结果稳定。

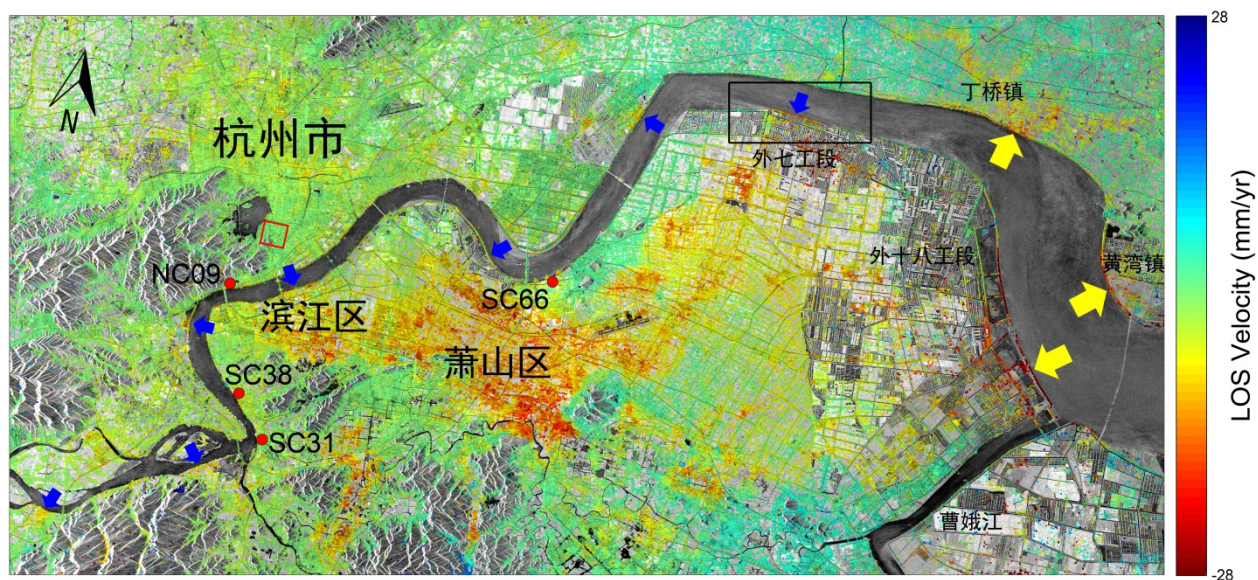


图 5-18 杭州地区 2006 年 1 月-2010 年 1 月的相干目标点的 LOS 方向形变速率分布

(底图为振幅均值图。蓝色为正值，表示地面抬升；红色为负值，表示地面沉降。红色方框为形变的参考区域。黄色箭头标记的是杭州湾海塘的沉降堤段；蓝色箭头标记的是钱塘江河口海塘的沉降堤段。)

将 PSInSAR 和 MTInSAR 方法在萧山区围垦外五至外九工段海塘的结果对比如图 5-19。可以明显看出 MTInSAR 方法能够提取到更加密集的相干目标点。进一步统计得到：在长约 9 km 的海塘上，PSInSAR 方法提取到 PS 点 36 个，平均点密度为 4/km，与海塘上水准测量每 300~500 m 一个测量点的密度相当；而 MTInSAR 方法提取相干目标点 99 个，平均点密度达 11/km，远远超过前两者的测量点密度。

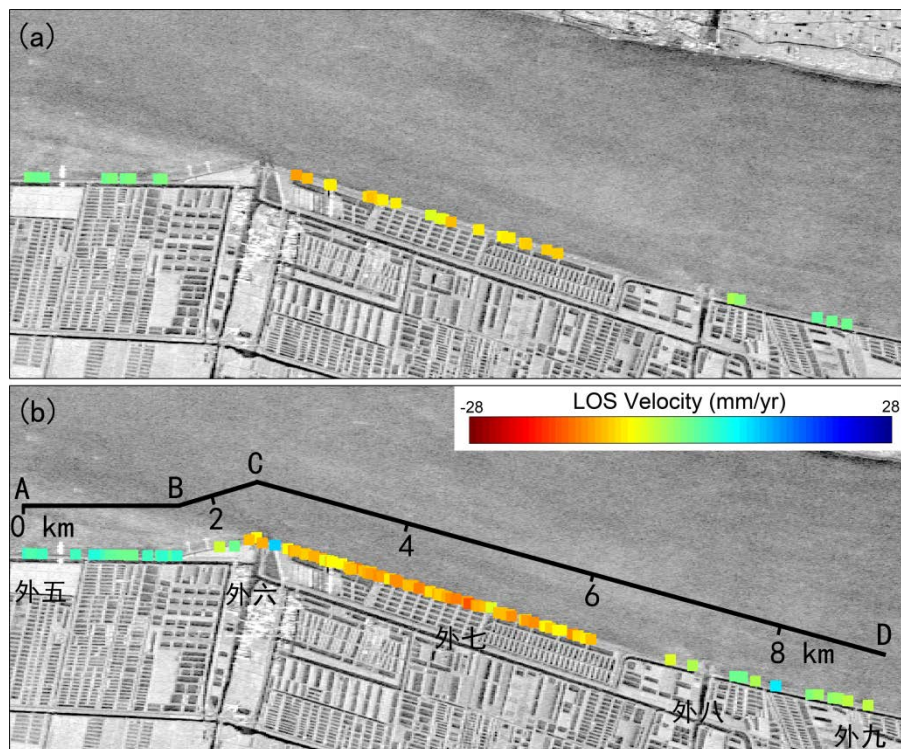


图 5-19 萧山区围垦外五至外九工段海塘的相干目标点分布。(a)为 PSInSAR 的结果(b)为 MTInSAR 的结果。

杭州地区地表沉降情况可由图 5-18 直观看出：沉降最严重是桐乡市屠甸镇，其 LOS 方向年平均沉降速率达到 27 mm。沉降范围最大的单片区域位于杭州市萧山区和滨江区，其中又以萧山区钱清镇最为严重，沉降年平均速率达到 20 mm。此外，萧山区的所前镇、临浦镇，余杭区的塘栖镇，绍兴市柯桥区的夏履镇和海宁市的丁桥镇也有小幅度的沉降变形。而杭州市市区的其余地区如西湖区、上城区、下城区、江干区、余杭区余部和萧山区的南部均无明显沉降，表明地表较为稳定。整个地区的地表在 LOS 方向上的形变的时间序列变化如图 5-20 所示。

钱塘江海塘沉降情况为：由整个实验区的统计结果可知：钱塘江南北两岸海塘在 4 年间 (2006 年 1 月至 2010 年 1 月)具有明显沉降的堤段有 10 处：7 处位于钱塘江河口 (图 5-18 蓝色箭头标记)，3 处位于杭州湾 (图 5-18 黄色箭头标记)；且杭州湾海塘的沉降幅度大于钱塘江河口海塘。其中，以杭州湾南岸的外十八工段至曹娥江大闸海塘、北岸的黄湾镇和丁桥镇海塘，以及钱塘江南岸的外六至外八工段海塘在沉降幅度和范围上最为显著，其 LOS 方向年均沉降速率均超过 20 mm/yr。

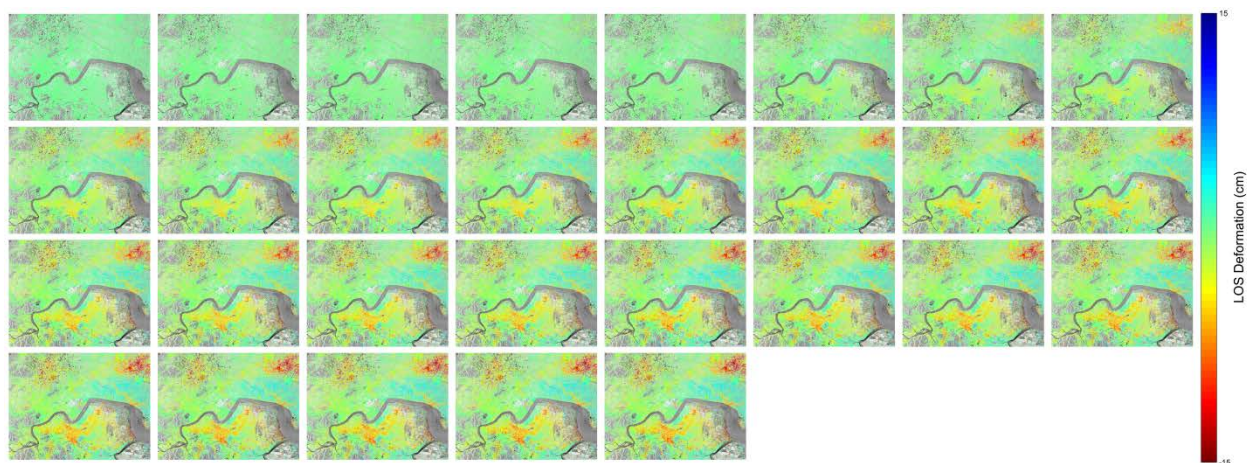


图 5-20 杭州地表在 LOS 方向的时间序列变化图 (2006 年 1 月~2010 年 1 月)

5.3.2 反演精度验证

根据钱塘江河口南北两岸海塘 2009~2012 年期间 12 期 136 个点的四等水准测量数据, 对 InSAR 结果进行精度验证。为尽可能减小由于水准数据与 InSAR 数据在空间位置和时间上的差异带来的误差, 验证数据的选择基于以下三个原则:

- (1) 仅选取水准点周围一定距离范围内的相干目标点, 考虑到 ASAR 影像 30 m 的空间分辨率, 距离阈值设为 100 m;
- (2) 由于海塘结构复杂, 不同部分, 如堆石、护坡、防浪墙和道路, 之间的形变模式并不相同, 因此仅选取位于防浪墙及其内侧 (水准点的分布位置) 的相干目标点;
- (3) 由于两种数据的时间范围并不完全重叠 (SAR: 2006 年 1 月 5 日至 2010 年 1 月 14 日; 水准: 2009 年 8 月 15 日至 2012 年 12 月 18 日), 因此仅选取重叠时期的测量数据。

最后, 将所有符合要求的相干目标点的形变测量值(从 LOS 方向转换到了竖直方向)的算术平均值与其相应的水准测量值进行对比。

根据上述条件, 选出符合要求的水准点 28 个, 其中水准数据的时间范围为 2009 年 8 月 15 日至 2009 年 11 月 27 日, InSAR 数据的时间范围为 2009 年 7 月 23 日至 2009 年 12 月 10 日, 对比结果如图 6 所示。可以看出: 两种方法测量的海塘形变趋势大体相近。对比数据统计显示: 两者测量结果的平均误差为 0.436 mm, 中误差为 1.582。说明 InSAR 的测量结果与实地水准测量结果吻合较好, 能够满足海塘沉降的监测需求。其中, 两者结果的最大差值为 5.016 mm, 位于 SC68 号点, 该水准点对应的相干目标点位于海塘防浪墙内侧道路的井盖上, 因此其形变模式显然异于防浪墙或其内侧的连接道路。

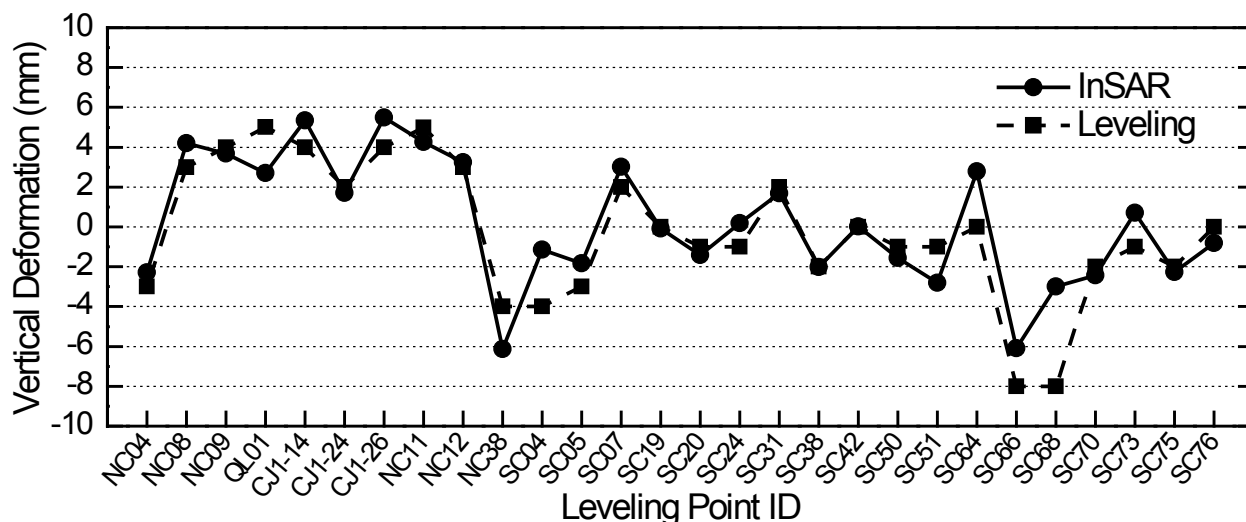


图 5-21 水准测量与 InSAR 测量的形变量的结果对比

(水准数据的时间：2009 年 8 月 15 日~2009 年 11 月 27 日；InSAR 数据的时间：2009 年 7 月 23 日~2009 年 12 月 10 日)

5.3.3 海塘形变规律分析

5.3.3.1 空间分布

选取萧山区围垦外六至外八工段海塘为研究对象 (见图 5-19)，对其沉降的空间分布进行分析。该段海塘属萧山围垦北线，是在 1978 年围堤的基础上，于 2002 年对内凹段进行裁弯取直后建成，以 50 年一遇防洪标准设计；但其护脚不够深，易受冲掏空，当主槽摆动临堤或涌潮顶冲时，抛石护坡的石方冲失严重(农机水利局, 2009)。因此于 2009 年 12 月至 2010 年 11 月期间，通过杭州市强塘工程，完成了标准塘一期工程施工，按百年一遇防洪标准进行了加固(徐卫桥, 2010)。

外五至外九工段海塘的时间序列形变的时空分布如图 5-22 外五至外九工段海塘形变的时间序列空间分布所示，其中所有点的距离均按照图 5-19 (b)中的三段直线 L1-3 进行了转换。可以看出在 2006 年 1 月至 2010 年 1 月期间，该段海塘的沉降在空间上连续，变化趋势满足中间大两边小的单峰下沉曲线。其中：外六至外八工段沉降明显，与其东西两端连接的外五和外九工段则相对稳定。根据时间可知：InSAR 测量的沉降趋势与实际情况吻合。

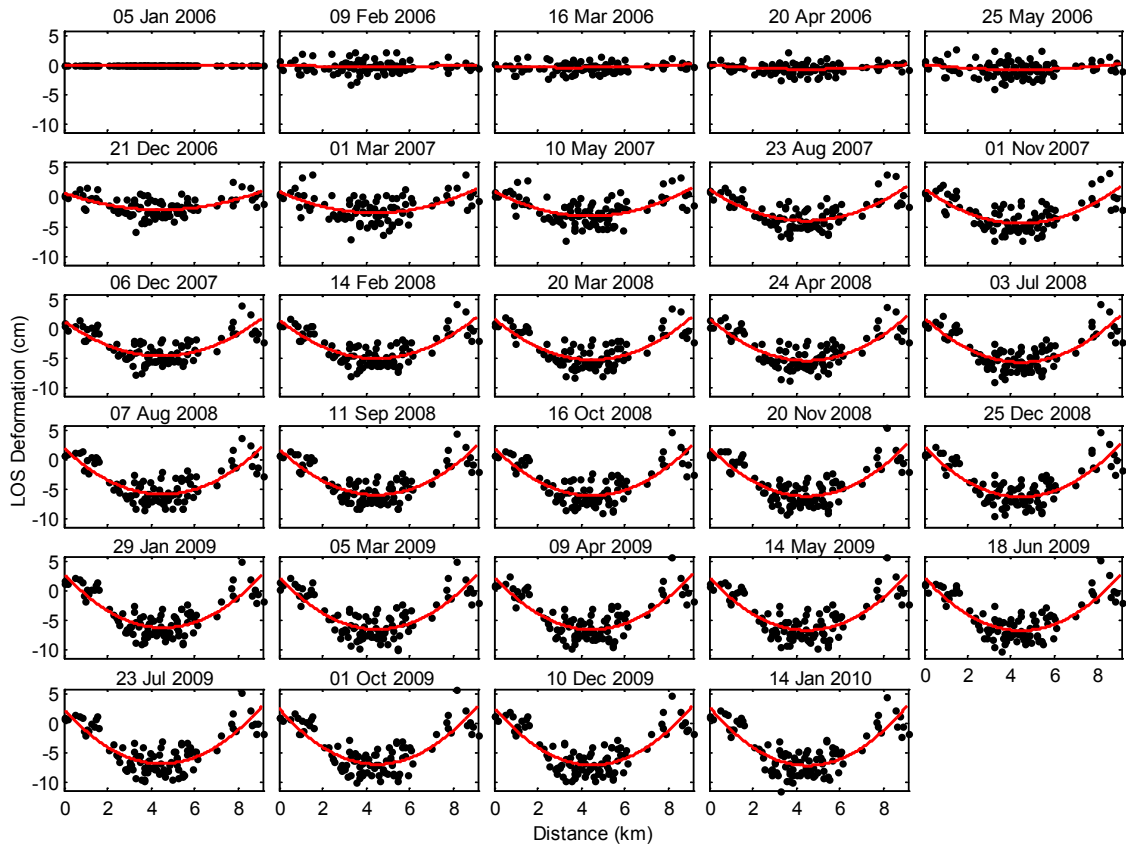


图 5-22 外五至外九工段海塘形变的时间序列空间分布

(外五至外九工段海塘形状上共由 L1、L2、L3 三段组成，如图 5-19 (b)所示。所有的形变值均以 2006 年 1 月 5 日为参考；所有点的距离换算到三条折线上并以左边第一个点为起算点。估计的形变趋势在图中用红色线条标出。)

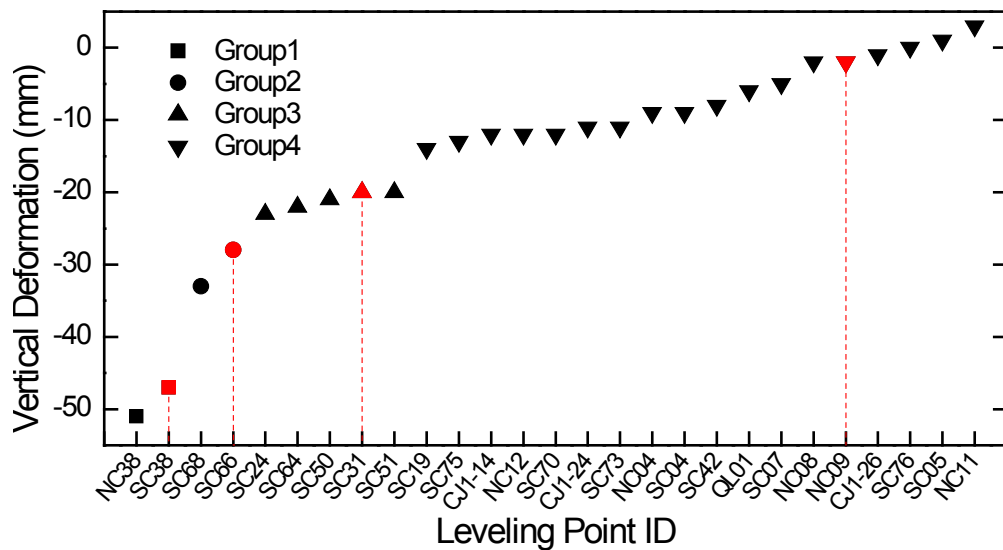


图 5-23 水准测量总形变量的 28 个点的分类结果

5.3.3.2 时间变化规律

利用 SAR 数据和水准数据重叠时间短、综合覆盖时间长的特点，对选取的 28 个验证点在长达近 7 年 (2006 年 1 月至 2012 年 12 月) 的形变随时间的变化规律进行分析。首先，根据水准测量的总形变量，对 28 个点进行分类，结果如图 5-23。由图可知：它们明显分成 4 种类型。从每种类型中，分别选取一个代表性的点 (图 5-23 中红色标记)，进行时间序列分析。四点的位置在图 5-18 中由红色圆点标出，分别为：位于上城区钱塘江大桥东北侧的 NC09，位于萧山区闻堰镇南部的 SC31 和北部的 SC38，以及位于萧山区下沙大桥东南侧的 SC66。

结合 InSAR 和水准测量数据，将四个点的沉降量随时间变化关系展示如图 5-24；每个子图中，左半部分的圆点实线表示 InSAR 测量结果，右半部分的方点虚线表示水准测量结果，形变的时间跨度为 2006 年 1 月~2012 年 11 月。由图可知：4 个点的沉降量在短时间范围内均有一定的波动，但在长时间范围内则呈现出明显的线性变化规律；其沉降速率按照 NC09、SC31、SC66、SC38 的顺序依次增大。

根据 4 个点的线性形变趋势，对其沉降的时序变化进行线性回归分析，拟合出沉降量随时间的线性变化关系，结果如图 5-24 中红色实线所示。可以看出：线性拟合结果与 InSAR 和水准测量结果吻合很好，说明两种方法独立测量所得的时间序列沉降趋势一致，进一步验证了 InSAR 测量结果的准确性。根据拟合参数，得到 4 个点的平均沉降速率的估计值，如表 5-2 所示。沉降量最大的 SC38 平均沉降速率为 12.6 mm/yr，其 7 年间的累计沉降量达 8.7 cm；而沉降量最小的 NC09 的平均沉降速率为 0.05 mm/yr。由图 5-23 可知，在 28 个点中，沉降最大的 Group1 类仅有 2 个点；而剩下的 26 个点沉降速率均小于 10 mm/yr，占了绝大多数，说明钱塘江河口两岸海塘整体上较为稳定。

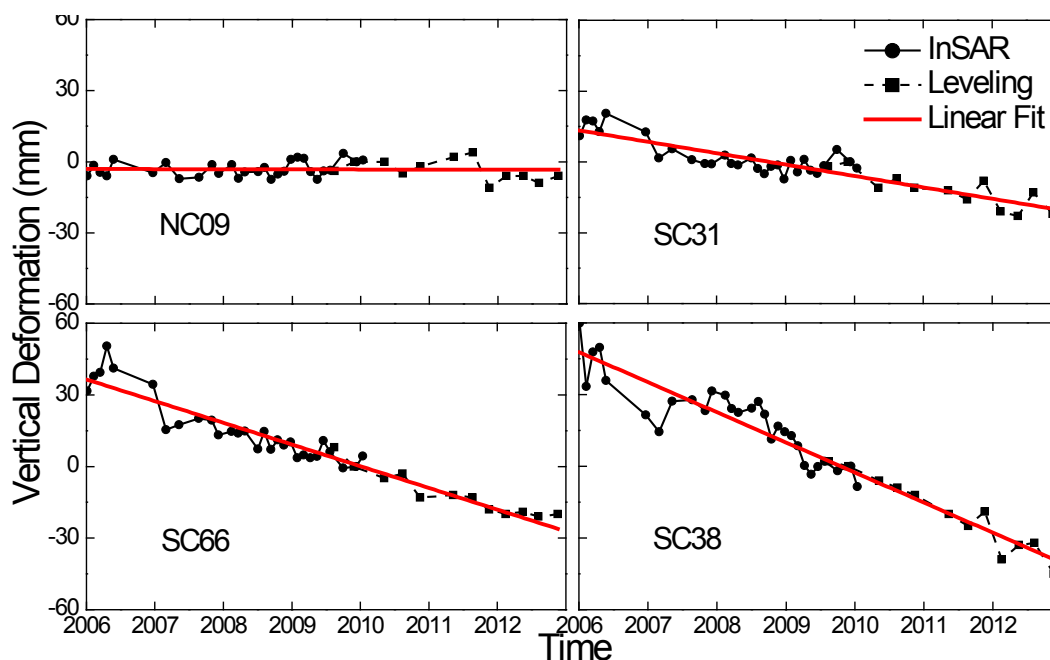


图 5-24 四个点在近 7 年间的时间序列沉降

(左半部分圆点实线表示 InSAR 测量结果，右半部分方点虚线表示水准测量结果，红色实线表示沉降结果的线性回归估计。)

表 5-2 2006~2012 年 4 个点沉降速率的线性回归估计值

水准点号	SC38	SC66	SC31	NC09
形变速率 (mm/yr)	-12.6	-9.1	-4.8	-0.05

5.4 结论与展望

本章利用 MTInSAR 方法，综合提取 PS 点和 DS 点，得到杭州地区 2006 年 1 月至 2010 年 1 月间的地表形变平均速率分布和沉降量的时间序列分布。与实地水准测量数据的对比，验证了 InSAR 测量结果的可靠性和准确性，说明该技术能够满足海塘沉降监测的精度要求。与 PSInSAR 方法对比说明了该方法能够提高了 InSAR 提取的相干目标点数量，使其在海塘上的测量密度上远远超过水准测量方法。共发现了 10 处沉降海塘堤段；且杭州湾海塘沉降段在沉降范围和幅度上均大于钱塘江河口海塘。通过对部分典型的沉降点和堤段的时间序列分析发现，钱塘江海塘的沉降在空间上具有连续性，其空间分布呈现为单峰下沉曲线；在时间上具有明显的线性变化规律，并伴随短时间范围内的小幅度波动；不同的堤段，其沉降速率有所不同，且大部分为轻度沉降。

未来将设计新的处理算法以进一步提高海塘上相干点的分布密度，并深度挖掘海塘沉降的规律及其与所处地质和环境的关系。

第6章 总结与展望

6.1 研究结论

根据 InSAR 测量结果与水准数据的对比,验证了 InSAR 技术毫米级的测量精度和准确性,证明了 InSAR 技术能够满足海塘沉降的精度要求。

通过 2006 年至 2010 年杭州地区的 InSAR 测量结果,发现了 10 处钱塘江海塘沉降堤段:3 处位于杭州湾两岸,7 处位于钱塘江河口两岸;且杭州湾海塘在沉降的范围和幅度上均大于钱塘江河口海塘。

通过 InSAR 和水准数据的结合分析,发现海塘的沉降在空间上具有连续性,且呈现单峰下沉曲线趋势;在时间上呈现较明显的线性沉降规律,并在短时间范围内伴随有小幅度的波动。

6.2 本文的创新点

近年来,随着以永久散射体技术为代表的雷达干涉测量方法的成熟与发展,MTInSAR 技术已经被广泛应用于矿区沉降、城市沉降、滑坡监测、高精度 DEM 提取等领域。本文利用雷达干涉测量的方法,监测海塘的稳定性和沉降变形,分析海塘的沉降规律,并在以下方法取得创新:

(1) 在国内首次将雷达干涉测量技术应用于海塘形变的空间分布和时间序列分析,获得了钱塘江海塘 2006 至 2010 年的 InSAR 形变测量结果,并结合水准数据分析了钱塘江海塘 2006 年至 2012 年的自然沉降规律;

(2) 提出了一种改进的基于相干性测度模型的干涉网络选取方法,在保证全局时间序列形变可解的前提下,增加高相干性干涉图数量,提高形变解算的稳健性;

(3) 针对海塘线性分布的特点,设计了面向分布式目标的自适应空间滤波方法,能够更加准确地估计线形地物的干涉相位和相干性;

6.3 下一步的工作

利用 InSAR 技术进行海塘沉降的监测与分析,本文虽然提出了一些创新,但仍存在不足之处;据

此，未来将积极开展以下工作：

(1) 浙江省地处亚热带地区，四季分明，因此杭州地区地物的季节性变化十分明显，未来需要进一步完善干涉像对的相干性测度模型，对多主影像策略中时间去相干的季节性行为进行建模；为了评价不同干涉组合方法之间的优劣，需要根据最终测量结果对多基线雷达干涉测量中稳定的形变信息反演所需的干涉图的相干性和数量进行定量地评价和测量。

(2) 定量分析海塘的后向散射机理。海塘的外形结构规则，其坡顶宽度通常为 6~10 米，小于中等 SAR 卫星影像空间分辨率 (30 米)，因此如何确定反演所得的形变信息具体反映在海塘细节部分的形变还需进一步研究。

(3) 结合海塘的修筑历史，对不同建筑结构的古海塘和当代海塘的沉降现状和沉降规律进行分析。

参考文献

- [1] Anderson, T.W., Darling, D.A., 1952. Asymptotic theory of certain "goodness of fit" criteria based on stochastic processes. The annals of mathematical statistics 23, 193-212.
- [2] Anderson, T.W., Darling, D.A., 1954. A test of goodness of fit. Journal of the American Statistical Association 49, 765-769.
- [3] Bamler, R., Hartl, P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse problems 14, R1-R54.
- [4] Bamler, R., Just, D., 1993. Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993. IGARSS'93. Better Understanding of Earth Environment., International. IEEE, pp. 980-984.
- [5] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 40, 2375-2383.
- [6] Burr, E.J., 1963. Distribution of the two-sample Cramér-von Mises criterion for small equal samples. The Annals of Mathematical Statistics 34, 95-101.
- [7] Butterworth, C., 2008. Measuring Seasonal Permafrost Deformation with Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DEPARTMENT OF GEOMATICS ENGINEERING UNIVERSITY OF CALGARY, CALGARY, ALBERTA.
- [8] Chen, C.W., 2001. Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry, Department of Electrical Engineering. Stanford University, Stanford, California, US.
- [9] Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2002. Seismic faults analysis in California by means of the permanent scatterers technique, Retrieval of Bio-and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, pp. 125-131.
- [10] Conover, W.J., 1980. Practical nonparametric statistics, 2 ed. John Wiley & Sons, New York.
- [11] Elachi, C., Van Zyl, J.J., 2006. Introduction to the physics and techniques of remote sensing. Wiley-Interscience, Hoboken, New Jersey.
- [12] Fattahi, H., Amelung, F., 2013. DEM Error Correction in InSAR Time Series. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 51, 4249-4259.
- [13] Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A., 2011. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 49, 3460-3470.
- [14] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 1999. Permanent scatterers in SAR interferometry, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International, pp. 1528-1530 vol.1523.
- [15] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. Geoscience and Remote Sensing, IEEE transactions on 38, 2202-2212.
- [16] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on 39, 8-20.
- [17] Foster, M., Guinzy, N., 1967. THE COEFFICIENT OF COHERENCE: ITS ESTIMATION AND USE IN GEOPHYSICAL DATA PROCESSING. GEOPHYSICS 32, 602-616.

- [18] Gatelli, F., Guarnieri, A.M., Parizzi, F., Pasquali, P., Prati, C., Rocca, F., 1994. The wavenumber shift in SAR interferometry. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 32, 855-865.
- [19] Goel, K., Adam, N., 2012. An advanced algorithm for deformation estimation in non-urban areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 73, 100-110.
- [20] Guarnieri, A.M., 2013. Introduction to RADAR. Politecnico di Milano Dipartimento di Elettronica e Informazione, Milano.
- [21] Hanssen, R., 1998. Atmospheric heterogeneities in ERS tandem SAR interferometry. Delft University Press.
- [22] Hanssen, R.F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Kluwer Academic Pub, Dordrecht, Netherlands.
- [23] Hooper, A., 2006. Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation, the department of geophysics. Stanford University, Stanford, pp. 35-36.
- [24] Hooper, A., 2008. A multi - temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters* 35, L16302.
- [25] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., Kampes, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters* 31, L23611.
- [26] Hooper, A., Zebker, H.A., 2007. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *JOSA A* 24, 2737-2747.
- [27] Hua, Z., Qiming, Z., Yihua, L., Xiaofan, L., Liang, G., 2005. The optimum selection of common master image for series of differential SAR processing to estimate long and slow ground deformation, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International*, pp. 4586-4589.
- [28] Jiang, M., Ding, X.-L., Li, Z.-W., Chi-Sheng, W., Wu, Z., Ling-Hong, K., 2013. InSAR coherence magnitude estimation based on data stack. *CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS-CHINESE EDITION* 56, 799-811.
- [29] Kampes, B.M., 2006. Radar interferometry: persistent scatterer technique. Springer.
- [30] Kvam, P.H., Vidakovic, B., 2007. Nonparametric statistics with applications to science and engineering. Wiley-Interscience, New Yorker.
- [31] Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M., Pepe, A., 2007. An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis. *Pure and Applied Geophysics* 164, 637-661.
- [32] Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E., 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 42, 1377-1386.
- [33] Lee, H., Liu, J.G., 2001. Analysis of topographic decorrelation in SAR interferometry using ratio coherence imagery. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 39, 223-232.
- [34] Mora, O., Lanari, R., Mallorquí, J., Berardino, P., Sansosti, E., 2002. A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms, *IGARSS 2002. IEEE, Toronto, Canada*, pp. 1237-1239.
- [35] Parizzi, A., Brcic, R., 2011. Adaptive InSAR stack multilooking exploiting amplitude statistics: A comparison between different techniques and practical results. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE* 8, 441-445.

- [36] Perissin, D., Ferretti, A., 2007. Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 45, 4043-4058.
- [37] Perissin, D., Ferretti, A., Piantanida, R., Piccagli, D., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A., Zan, F.d., 2007. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets, *Fringe 2007*, Frascati, Italy.
- [38] Perissin, D., Wang, T., 2012. Repeat-pass SAR interferometry with partially coherent targets. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 50, 271-280.
- [39] Perissin, D., Wang, Z., Lin, H., 2012. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 73, 58-67.
- [40] Pettitt, A.N., 1976. A two-sample Anderson-Darling rank statistic. *Biometrika* 63, 161-168.
- [41] Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., Li, F.K., Madsen, S.N., Rodriguez, E., Goldstein, R.M., 2000. Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE* 88, 333-382.
- [42] Sansosti, E., Casu, F., Manzo, M., Lanari, R., 2010. Space-borne radar interferometry techniques for the generation of deformation time series: An advanced tool for Earth's surface displacement analysis. *Geophysical Research Letters* 37, L20305.
- [43] Shi, X., Liao, M., Wang, T., Zhang, L., Shan, W., Wang, C., 2014. Expressway deformation mapping using high-resolution TerraSAR-X images. *Remote Sensing Letters* 5, 194-203.
- [44] Stephens, M.A., 1970. Use of the Kolmogorov-Smirnov, Cramér-Von Mises and related statistics without extensive tables. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 32, 115-122.
- [45] Touzi, R., Lopes, A., Bruniquel, J., Vachon, P.W., 1999. Coherence estimation for SAR imagery, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, pp. 135-149.
- [46] Wang, T., 2009. Multi-Image InSAR Analysis over the Three Gorges Region: Techniques and Applications, Dipartimento di Elettronica e Informazione (DEI). Politecnico di Milano (POLIMI), Milano, Italy, p. 129.
- [47] Wang, T., Perissin, D., Rocca, F., Liao, M.-S., 2011. Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. *Science China Earth Sciences* 54, 720-732.
- [48] Wikipedia, 2013. 杭州市.
- [49] Xie, C., Shao, Y., Xu, J., Wan, Z., Fang, L., 2013. Analysis of ALOS PALSAR InSAR data for mapping water level changes in Yellow River Delta wetlands. *International Journal of Remote Sensing* 34, 2047-2056.
- [50] Zebker, H.A., Rosen, P.A., Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *J. geophys. Res:Solid Earth (1978-2012)* 102, 7547-7563.
- [51] Zebker, H.A., Villasenor, J., 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 30, 950-959.
- [52] Zebker, H.A., Werner, C.L., Rosen, P.A., Hensley, S., 1994. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 32, 823-836.
- [53] Zhang, Y., Xie, C., Shao, Y., Yuan, M., 2013. ADAPTIVE SPATIAL FILTERING OF INTERFEROMETRIC DATA STACK ORIENTED TO DISTRIBUTED SCATTERERS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-7/W1, 173-178.
- [54] 陈富龙, 林琿, 程世来, 2013. 星载雷达干涉测量及时间序列分析的原理、方法与应用. 科学出版社, 北京.
- [55] 陈强, 丁晓利, 刘国祥, 2008. PS-DInSAR 公共主影像的优化选取. *测绘学报* 36, 395-399.

- [56] 陈希海, 周素芳, 1999. 钱塘江海塘标准塘工程. 水利水电科技进展 19, 39-46.
- [57] 邓起东, 张培震, 2002. 中国活动构造基本特征. 中国科学: D 辑 32, 1020-1030.
- [58] 丁伯阳, 叶继青, 孟凡丽, 陶海冰, 2003. 杭州市周边构造和断层及其对建、构筑物的影响. 浙江工业大学学报 31, 319-323.
- [59] 杭州统计信息网, 2013. 2012 年杭州市国民经济和社会发展统计公报, 杭州.
- [60] 国务院, 2006. 国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020 年).
- [61] 蒋弥, 丁晓利, 李志伟, 汪驰升, 朱武, 柯灵红, 2013. 基于时间序列的 InSAR 相干性量级估计. 地球物理学报 56.
- [62] 廖明生, 林琿, 2003. 雷达干涉测量: 原理与信号处理基础. 测绘出版社.
- [63] 农机水利局, 2009. 杭州市萧山区钱塘江堤塘防御台风暴潮预案, in: 杭州市萧山区农机水利局 (Ed.). 杭州市萧山区政府, 杭州.
- [64] 潘斌, 2010. 合成孔径雷达差分干涉测量用于地质灾害形变监测的研究, 遥感信息工程学院. 武汉大学, 武汉, p. 199.
- [65] 潘斌, 舒宁, 2010. 聚类分析用于序列 SAR 干涉像对选取. 应用科学学报 28, 501-506.
- [66] 钱管局勘设院, 2012. 浙江省海盐县海塘配套加固与管理规划, in: 浙江省钱塘江管理局勘测设计院 (Ed.). 海盐县发改局、水利局, 海盐.
- [67] 水利部, 2009. 海堤工程设计规范 (SL 435-2008) 实施指南. 中国水利水电出版社, 北京.
- [68] 陶存焕, 戴泽衡, 1997. 明清时期钱塘江海塘. 水利规划, 73-78.
- [69] 陶秋香, 刘国林, 2011. PS InSAR 公共主影像优化选取的一种新方法. 武汉大学学报: 信息科学版 36, 1456-1460.
- [70] 王洒, 宫辉力, 杜钊峰, 顾兆芹, 2013. 永久散射体干涉测量中最佳主图像选取. 测绘学报, 87-93.
- [71] 徐卫桥, 2010. 区监察局对萧围外六至外八工段标准塘一期工程实施效能监察. 杭州市萧山区农机水利局, 杭州.
- [72] 颜学军, 孙昌友, 2008. 东浦新塘运行状况调查与分析. 小水电, 81-82.
- [73] 岳德亮, 2009. 浙江沿海海塘沉降变形隐患渐显. 新华网, 杭州.
- [74] 岳建平, 方露, 2012. 城市地面沉降监控理论与技术. 科学出版社, 北京.
- [75] 浙江省财政厅、水利厅, 2010. 浙江省“强塘”工程专项资金管理办法, in: 浙江省财政厅、浙江省水利厅 (Ed.). 浙江省财政厅、浙江省水利厅, 浙江.

参与的科研项目

- 1) 水利部公益性行业科研专项经费项目：海塘工程实时安全监测及预测预警技术研究，2013-2014
- 2) 国家科技支撑计划项目：青海湖流域土壤与水环境参量反演关键技术研究，2012

发表的文章列表

- [1] **张云俊**, 万紫, 谢酬, 邵芸, 袁名欢, 陈武, 王新. 2014. 基于时间序列 InSAR 的杭州海塘形变分析. 遥感学报.
- [2] **Zhang, Y.**, Xie, C., Shao, Y., and Yuan, M.: ADAPTIVE SPATIAL FILTERING OF INTERFEROMETRIC DATA STACK ORIENTED TO DISTRIBUTED SCATTERERS, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-7/W1, 173-178, doi:10.5194/isprsarchives-XL-7-W1-173-2013, 2013.
- [3] Yuan M., Xie C., Shao Y., **Zhang Y.**, An Advanced Algorithm for the Accurate Interferogram Estimation, the 34th Asian Conference on Remote Sensing; Oct; Bali, Indonesia: 2013.

致谢

回顾硕士三年的学习生活，往如昨日。在玉泉校区，重新感受了大学似的学习和班级的温暖；在遥感所 B 座 318，在 730 个日日夜夜里，完成迄今为止最为艰辛的奋斗！值此论文即将付梓之际，谨在此感谢多年来给予我关心和帮助的老师、同学、朋友和家人表示由衷的感谢！

首先，我要对我的导师—邵芸研究员表示深深的感谢！邵老师以其渊博的学术知识、严谨的治学态度以及对科研工作无比的热情深深影响了我。在课程选定、论文的选题、撰写、答辩过程中，她给予了悉心的指导，使我受益匪浅。更重要的是在科研思维的培养上，邵老师宽阔的眼界、科学严谨的思维以及对问题的迅速把握，使我望其项背。在日常生活中，导师乐观的态度、准确的表达和有效地交流是我学习的榜样。在人生道路抉择的关键时期，老师的科研和生活态度让我看到了科研生涯的真正形象，对我今后的科研、学习和生活起着不可估量的影响。

我还要特别感谢课题组的谢酬副研究员。在我的硕士科研中，他给予了我悉心的指导，鼓励和数不尽的帮助。在一个技术性很强、需要经验的研究方向上，如果没有他，我很难想象自己能够独立完成硕士科研课题。他乐观的生活态度、务实的科研精神、有计划地处理事务和解决问题的能力都是我学习和模仿的模板。本文的选题、实施和撰写倾注了他诸多的汗水和心血。

在雷达室的学习期间，也得到了许多同学的帮助。感谢师姐张婷婷、李坤，感谢师兄袁名欢、刘龙、王龙飞、王国军、柴勋、万紫、刘力、方亮、孙启凯，感谢邻桌徐旭，师弟杨知、符喜优；感谢秘书范建华，感谢他们在我科研和生活上的帮助。

还要感谢遥感所的 Hasan 博士、覃邦勇博士、Shakir 博士、赵静、王蒙，以及 2011 级的同学们，他们是朱鹏、曾也鲁、赵仁辉、刘雄飞、李明磊、徐源璟、刘书含、李雪珂、赵玉金、邵静、余晓君、高应波、耿晓庆、尚华哲、杨延青、彭彬、钱丹，你们是硕士三年生活中的重要的记忆和快乐！

感谢中国科学院大学的唐家奎副教授在集中教学期间对我的诸多指导和有益交流；感谢武汉大学的胡鸿兴教授和潘斌教授对我出国申请的大力帮助。

感谢李曦尧和老同学张彦峰、潘茂华、伍阳雪、邹梦月、陈昱茂、刘洋、王俊杰、黄龙、卢业伟、吕臻、蒋志鸿的数不尽的陪伴和倾述。

最后，我要感谢我的父母、姐姐、姐夫和叔叔，有了他们的支持和鼓励，我的内心才有动力支持到今天！

