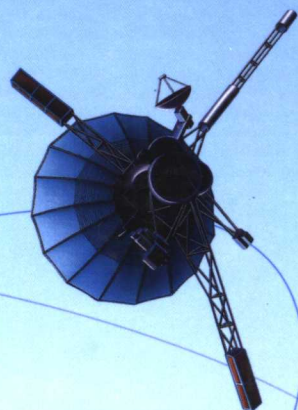


基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI与InSAR干涉条纹图处理方法

于起峰 伏思华 著



 科学出版社
www.sciencep.com

国防科技大学学术
专著出版基金资助

基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法

于起峰 伏思华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

对于干涉条纹图的处理是现代测量技术的重要内容之一。本书总结了作者在干涉条纹图处理方面 20 余年的成果, 主要介绍了旋滤波与等值线滤波方法, 即如何利用条纹方向信息, 在条纹切线或等值线上进行滤波来高效滤除噪声, 并保持相位信息不受损害。此外, 本书还介绍了新概念的等值线相关干涉法, 应用于 ESPI 和 InSAR, 用以生成无斑点噪声、无相位畸变的干涉条纹图。

本书可用作从事光学、雷达、测绘等信号处理领域各类干涉条纹图处理研究的科研人员和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于条纹方向和条纹等值线的 ESPI 与 InSAR 干涉条纹图处理方法/于起峰, 伏思华著. —北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-018670-6

I. 基… II. ①于… ②伏… III. 线纹干涉仪 IV. TH744.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007) 第 027404 号

责任编辑: 鄢德平 张 静 / 责任校对: 刘亚琦

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 1 月第一次印刷 印张: 10 1/4

印数: 1—2 500 字数: 187 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

电子激光散斑干涉技术 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 和合成孔径雷达干涉技术 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 都是当今信息社会中信息技术与各自相应学科相结合产生的国际上快速发展的新型干涉测量技术。ESPI 是用于测量微小变形、表面形貌的光学干涉测量技术,它具有非接触、灵敏度高、全场测量和抗干扰性强而可用于工况现场等突出优点,是应用最广泛的光学干涉测量技术之一。InSAR 是利用合成孔径雷达 (SAR) 图像进行干涉,测量地球三维地形、地貌的新型遥感技术,具有可测量三维高程信息、测量精度高、全天候、测量范围大等突出优点,是目前遥感领域备受追捧的新技术。

但 ESPI 和 InSAR 分属于不同的大学科类,前者属于光学工程和实验固体力学学科领域,而后者属于电子雷达信号处理和测绘学科领域。虽然 ESPI 和 InSAR 两者信号的来源、性质、物理意义等都有很大的不同,但又有一些核心的共性:两者的数据源都是隐藏有相位场的随机散斑场,并且两者表现形式都是用某种干涉方法形成的含高强度散斑噪声的干涉条纹图(在进行两者的干涉条纹图数据处理中,两者既有各自的特性,更多的是两者共有的共性)。由于 ESPI 和 InSAR 分属于两个大的不同学科,研究人员都相对较为独立,造成研究的思想和方法也相对较为独立。如果将两者的研究相互结合、借鉴,对两者的发展大有益处。

作者从 20 世纪 80 年代中期开始了对干涉条纹图处理的研究,主要针对云纹、全息、光弹等常规干涉条纹图。1988 年作者在美国 *Applied Optics* 上发表用于干涉条纹图无损(少损)滤波的旋滤波方法,是国际上最早提出利用条纹方向信息进行任意条纹图处理的思想和方法。在随后的近 20 年间,对这一思想和原理进行了不断地发展、完善,特别是 90 年代在德国不来梅大学应用光学研究所 (BIAS) 做博士论文期间,在 W.Jueptner 教授和 W.Osten 教授的指导下,在这方面的理论研究水平有了较大提升。近十年来,作者将条纹方向、条纹等值线的思想和原理进一步推广到更具挑战性的电子散斑干涉条纹图处理中,提出了 ESPI 的等值线相关干涉法 (contoured correlation interferometry, CCI),使原来充满散斑噪声、信噪比近似为 1 的传统 ESPI 条纹图变成了光滑无噪声、正则化的、无相位模糊的 CCI 干涉条纹图,并取得了更大的成功,在 *Optics Express*、*Applied Optics*、*Optical Engineering* 等国际杂志上发表了 20 多篇论文。

2003 年底作者受德国政府学术交流中心 (DAAD) 资助到慕尼黑国防军大学进行研究访问,期间,在作者受邀请作学术讲座后, H. Mayer 教授和德国宇航中心 (DLR) 的 H. Suess 教授都建议作者用于 ESPI 的 CCI 方法有可能用于 InSAR 数据处理。回国后作者与课题组进行了三年多的 InSAR 数据处理方面的研究,提出

了用于 InSAR 的等值线滤波法和生成干涉条纹图的新概念干涉法: InSAR 的 CCI 方法。InSAR 的 CCI 方法不但可以生成不含斑点噪声、无相位畸变的干涉相位图, 并且只需要常规方法要求的四幅子图中的任意三幅子图。该成果在 *Applied Physics Letters* (影响因子 4.13) 和 *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* (2 篇) 发表了论文。

对干涉条纹图的处理是现代测量技术的重要内容之一。本书总结了作者在干涉条纹图处理方面 20 余年的成果, 主要介绍了旋滤波与等值线滤波方法, 即如何利用条纹方向信息, 在条纹切线或等值线上进行滤波来高效滤除噪声, 并保持相位信息不受损害。此外, 本书还介绍了新概念的等值线相关干涉法, 应用于 ESPI 和 InSAR, 用以生成无斑点噪声、无相位畸变的干涉条纹图。本书可用作从事光学、雷达、测绘等信号处理领域各类干涉条纹图处理研究的科研人员和研究生的参考书。

全书共分为 7 章。第 1 章为绪论, 概述了 ESPI、InSAR 技术及其图像处理技术的发展。第 2 章对 ESPI 的基本原理从信息记录方法、干涉条纹图的生成方法、相位测量方法等方面进行论述; 对 InSAR 干涉测量方法的基本原理, 从干涉模式、干涉几何原理、数据处理过程等方面进行了论述。第 3 章给出了 ESPI 及 InSAR 中干涉条纹方向的定义和性质, 介绍了几种条纹方向图的求取方法及条纹密度估计方法, 最后给出条纹等值线窗口的定义和几种求取方法。第 4 章介绍了 ESPI 和 InSAR 干涉条纹图的自适应等值线窗口滤波方法。第 5 章介绍了生成 ESPI 干涉条纹图的等值线相关干涉法及其相位提取方法。第 6 章介绍了 InSAR 复图像对的三幅子图配准方法。第 7 章介绍了生成 InSAR 干涉相位图的等值线相关干涉法, 并进行了详细论述。

本书的内容是作者所在课题组 20 多年的成果, 凝聚着集体的心血, 是集体智慧的结晶。杨夏博士生负责提供了部分有关等值线窗口与自适应窗口滤波的内容和数据, 孙祥一副教授在 ESPI 从方向图确定条纹等值线方面作了重要贡献, 雷志辉副教授为实验和数据的获取做了许多工作。德国慕尼黑的 H. Mayer 教授和 H. Suess 教授提出非常关键的建议和鼓励, 并提供了部分 InSAR 数据。研究过程中, 作者还得到了香港中文大学地球信息科学联合实验室林珏教授、德国波茨坦地学研究中心夏耶教授的指导与帮助。国防科学技术大学电子工程学院的梁甸农教授、朱炬波教授、董臻副教授、黄海风讲师对我们的工作给予了非常有益的指导和帮助。天津大学的陈金龙教授、湖南大学的王耀南教授提供了重要的实验数据。在此向他们表示由衷的感谢。

本书的研究工作得到国家自然科学基金 (19872077、10472133) 的资助, 在这里一并表示感谢。

由于作者水平和写作时间所限, 书中难免存在错误及不当之处, 敬请读者不吝指教。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 ESPI 的发展及其图像处理方法概述	3
1.2.1 ESPI 的发展	3
1.2.2 ESPI 图像处理方法综述	5
1.2.3 ESPI 相位主值图的去噪方法	6
1.2.4 ESPI 的相位测量方法	7
1.3 InSAR 的发展及其图像处理方法概述	7
1.3.1 InSAR 的发展	7
1.3.2 InSAR 图像处理方法综述	8
1.4 本书的目的与内容	10
第 2 章 电子散斑与合成孔径雷达干涉测量的基本原理	13
2.1 引言	13
2.2 电子散斑干涉测量技术的基本原理	14
2.2.1 散斑场的基本性质	14
2.2.2 散斑干涉测量的信息记录方式	18
2.2.3 散斑干涉条纹图的生成方法	21
2.2.4 ESPI 干涉条纹图处理方法	24
2.3 InSAR 干涉测量的基本原理	29
2.3.1 InSAR 干涉测量的几种模式	29
2.3.2 InSAR 干涉测量的几何原理	31
2.3.3 InSAR 干涉测量的数据处理过程	32
2.3.4 ESPI 与 InSAR 数据处理过程的同异比较	34
第 3 章 条纹方向与条纹等值线的提取	36
3.1 引言	36
3.2 条纹方向图的定义	38
3.3 求取条纹方向图的方法	39
3.3.1 平面拟合方法	40

3.3.2	梯度方法	42
3.3.3	平面拟合与梯度法相结合的方法	44
3.3.4	累积平方差法	44
3.3.5	窗口尺寸对求取条纹方向的影响分析	47
3.3.6	InSAR 方向图的求取	49
3.3.7	对方向图滤波的正余弦滤波方法	50
3.4	条纹密度估计	52
3.4.1	累积灰度差法	52
3.4.2	利用条纹方向和条纹中心线估计条纹密度	53
3.4.3	基于二值化条纹图的条纹密度估计方法	54
3.4.4	基于梯度的条纹密度估计方法	56
3.5	确定条纹等值线窗口	57
3.5.1	由条纹方向图得到等值线窗口	58
3.5.2	由条纹方向和条纹灰度梯度来确定等值线窗口	60
3.5.3	条纹中心线均分法	61
3.5.4	三种等值线窗口求取方法的比较	62
第 4 章	ESPI 与 InSAR 干涉条纹图的等值线滤波方法	64
4.1	引言	64
4.2	用于条纹图的各种旋滤波算法	65
4.2.1	常用的几种旋滤波	66
4.2.2	旋滤波的应用实例与比较	70
4.3	等值线窗口滤波	72
4.3.1	ESPI 干涉条纹图的等值线窗口滤波	72
4.3.2	用于 InSAR 干涉条纹图的等值线窗口滤波法	74
4.4	自适应等值线窗口滤波	80
4.4.1	ESPI 条纹图的自适应等值线窗口滤波	80
4.4.2	InSAR 干涉相位图的自适应等值线窗口滤波	81
第 5 章	ESPI 中的等值线相关干涉法及相位提取方法	84
5.1	引言	84
5.2	生成 ESPI 干涉条纹图的等值线相关干涉法	85
5.2.1	相关模式生成干涉条纹图	85
5.2.2	生成散斑干涉条纹图的等值线相关干涉法(CCI)	89
5.3	生成 ESPI 干涉条纹图的自适应等值线窗口相关法	92
5.4	基于等值线相关干涉条纹图的相位提取方法	95
5.4.1	基于 CCI 条纹图的中心线提取方法	95

5.4.2 基于单幅 CCI 条纹图的相位提取方法	97
5.4.3 基于 CCI 条纹图的单步与多步相移法提取相位场	98
第 6 章 InSAR 复图像对的三幅子图配准方法	105
6.1 引言	105
6.2 复图像对配准的一般步骤	106
6.2.1 基于轨道参数的粗配准方法	106
6.2.2 InSAR 复图像对配准的步骤	107
6.3 配准质量评价方法	111
6.3.1 相干系数	111
6.3.2 残余点	113
6.4 三子图相干系数配准方法	115
6.4.1 公式推导	115
6.4.2 InSAR 三子图配准方法的基本步骤	120
6.5 实验结果与分析	120
6.5.1 实验数据描述	120
6.5.2 实验结果及分析	122
第 7 章 生成 InSAR 干涉相位图的等值线相关干涉法	127
7.1 引言	127
7.2 InSAR 的 CCI 算法的公式推导	128
7.3 InSAR 相关干涉法的不同推导方法	130
7.3.1 三子图不同组合的 CCI 方法推导	130
7.3.2 矩形窗口相关干涉法的公式推导	131
7.3.3 协方差相关公式的推导	133
7.4 CCI 算法的主要步骤	134
7.5 实验结果及分析	135
7.6 CCI 方法处理结果小结	141
参考文献	143
缩略语表	152

第1章 绪 论

1.1 引 言

在知识爆炸的信息社会,科学技术的飞速发展和对未知世界的探求促使人们不断发明和发展各种新的测量手段,以适应当今社会越来越高和越来越广的测量要求。电子散斑干涉测量技术 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI) 与合成孔径雷达干涉测量技术 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 正是在这种要求下出现的两种既相似又互相区别的测量手段,是当今信息社会中信息技术与各自相应学科相结合产生的国际上快速发展的新型干涉测量技术。

电子散斑干涉测量技术是一种对粗糙表面进行无损全场光学测量的技术,是在现代高科技成果 (激光技术、全息技术、视频技术、电子技术、信息与图像处理技术、计算机技术、精密测试技术等) 基础上发展起来的^[1]。其基本思想是:相干光束照射被测物体表面,从粗糙表面发生各个方向的反射,入射光与反射光相互干涉形成原始散斑干涉场。在物体状态发生改变前后分别记录原始散斑场,将这两次记录的图像信号进行相减或者其他处理,就产生了携带物体状态改变信息的散斑干涉条纹图。通过对条纹的处理和分析,可以得到被测物体的状态改变信息。

由于散斑干涉测量技术具有结构方法简单、非接触全场测量、不需光学平滑表面、抗干扰性强而可用于工况现场等突出优点,被广泛地应用于位移、应变、振动、表面形貌等各方面的测量中,是应用最广泛的光学干涉测量技术之一,是当今国际上光学测量领域的热门课题之一^[2~5]。美国、英国、德国、日本、挪威等发达国家都在努力开拓具有高精度、快速定量分析能力、高抗干扰能力的电子散斑干涉测量系统^[6~8]。我国也在 20 世纪 80 年代后期开始从事散斑测量技术的理论与工程实用化研究,并取得了一定的研究成果^[9~14]。

合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 遥感技术近二十多年来发展迅猛,已成为获取地球空间信息的重要手段,不仅能快速大面积测制各种比例尺的地图和其他空间信息产品,而且在土地资源调查、环境监测、减灾防灾等领域也发挥着日益重要的作用^[15]。利用遥感影像进行目标的识别、信息提取和地形测绘等理论和技术的研究开发,拓展遥感技术在经济、社会发展和军事等领域的应用,已经越来越受到各国的重视。同时,也对遥感影像信息的获取手段和信息处理技术提出了更高的要求。SAR 本身是一种主动式传感器,具有全天候、全天时获取数据,并能穿透云雾、烟尘和大面积获取地表信息的特点,已成为对地观测领域不可或缺的

传感器, 尤其适用于传统光学传感器成像困难的地区^[16]。但是 SAR 图像只能得到地表二维平面信息, 得不到重要的地面高度信息。合成孔径雷达干涉测量技术就是在这样的背景下出现的新技术。

InSAR 技术成功地综合了 SAR 成像原理和干涉测量原理, 对 SAR 复图像对进行干涉, 并利用传感器的系统参数、姿态参数和轨道之间的几何关系等信息, 可以精确测量地表某一点的三维空间位置及其微小变化, 即可以得到三维地面高度信息^[17]。InSAR 技术从 1969 年首次披露用于金星表面测绘^[18]以来, 在最近的十多年取得了重大突破, 已成为雷达遥感领域中引人瞩目的重要分支。InSAR 具有可测量三维高程信息、测量精度高、全天候、测量范围大等突出优点, 是测量地球三维地形、地貌的新型遥感技术。

目前, InSAR 技术正在朝实用化方向发展, 并不断拓展应用领域^[19]。例如, 在测绘领域, 其大面积快速获取三维空间位置和微小变形的能力, 由于可以达到提取数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 的目的, 使之迅速成为空间大地测量的高新技术手段之一。2000 年美国航天飞机雷达地形测图计划 (shuttle radar topography mission, SRTM) 在 11 天内可以获取全球 80% 地表三维地形信息, 展示了 InSAR 令人惊叹的能力。实际上, InSAR 技术的应用已不再局限于最初的地形测绘领域, 而已经扩展到灾害监测、资源调查等许多领域, 应用潜力巨大。为了提高 InSAR 技术的实用性, 新的 InSAR 遥感计划也在孕育之中^[20]。随着 InSAR 遥感数据获取系统和信息处理手段的发展, 有可能实现全球地表形变状况的准实时监测和更为准确的地质灾害预报^[21]等。

电子散斑干涉测量技术与合成孔径雷达干涉测量技术的信号来源、性质、物理意义等都有很大的不同, 但两者又存在许多相似之处, 具有一些核心的共性。两者的数据源都是隐藏有相位场的随机散斑场, 两者的表现形式都是由随机散斑信号场干涉形成的含高强度散斑噪声的干涉条纹图, 并最终从条纹图中提取待求相位信息。所不同的是 ESPI 记录的是随机散斑场的强度信号, 而 InSAR 记录的是随机散斑场的带有相位的复数信号, 因此它们的基本干涉方法不同, ESPI 通常采用相减模式, InSAR 采用共轭相乘模式来生成干涉条纹图。这两种方法都保留了大量的散斑噪声, 这些斑点噪声是 ESPI 和 InSAR 数据处理中的共同的最主要困难之一。在进行 ESPI 和 InSAR 的干涉条纹图处理中, 两者既有各自的特性, 更多的是两者共有的共性。

但是由于 ESPI 和 InSAR 分属于不同的大学科类, ESPI 属于光学工程和实验固体力学学科领域, 而 InSAR 属于电子雷达信号处理和测绘学学科领域, 研究人员都相对较为独立, 造成研究的思想和方法也相对较为独立。如果将两者的研究相互结合、借鉴, 对两者的发展是大有益处的。下面先分别对 ESPI 和 InSAR 的发展和特点作简要的综述, 最后再介绍本书试图在同一个框架下对两者进行研究的思

想和安排。

1.2 ESPI 的发展及其图像处理方法概述

1.2.1 ESPI 的发展

当一束相干光照射到物体的粗糙表面时,入射光与杂乱的反射光发生干涉,在物体前面的空间将布满杂乱的颗粒状光斑,被称之为散斑(speckle)。散斑现象早在牛顿时期就已被人们所知,但直到激光发明后,全息术成为光学研究中最活跃的领域,散斑现象才受到人们的重视。

散斑开始是作为影响全息质量的光学噪声而得到研究的,人们总是想方设法来消除散斑。1966年,Ennos在实验中发现散斑具有可测的强度和确定的相位^[22],为散斑的应用奠定了基础。自此,人们逐渐认识到散斑不仅仅是一种噪声,还可以作为测量信息的载体,并对散斑测量技术进行了大量的研究。

1968年,J.M.Burch和J.T.Tokardki首先提出散斑干涉原理,并用于疲劳检测方面。

1969年,Leendertz在国际光学会议上提出了散斑相关干涉计量术,这是散斑计量技术的一个重要发展。基于这种思想,他又提出了剪切散斑干涉术。

1970年,Leendertz开创了以干涉方法实现信息的记录和表征的光学粗糙表面检测新方法,称为散斑干涉测量^[23]。它的信息记录和表征本质上与全息干涉测量相同,形式上更加灵活,尤其是其同轴或准同轴形成原始散斑干涉场的特点,使之不仅可以用光学方法实现,还可以用电子学和数字方法实现。散斑干涉测量方法在实验力学中的主要应用之一是测量物体的位移、应变、振动等。这种测量方法不但具有非接触的优点,而且可以测量面内及离面的变形、物体表面的应变,比较圆满地解决了振动与瞬变的问题。在光学实现方法中,原始散斑场以光学方法记录,以光学信息处理技术实现信息的表征。这种方法通常将散斑干涉图记录在全息干版上,因而必须经过繁杂的显影、定影处理以及再现过程,而这些过程必须严格在暗房中进行,从而使散斑干涉在工程中的推广应用受到限制。

1971年英国科学家Butters与Leendertz^[24]和美国的Makovski^[25]同时采用模拟电视摄像管代替全息照相干版记录散斑图,一个相减器和滤波器用来处理摄像管记录的电子信号,从而得到表示物体位移、变形的干涉条纹。这种方法就是电子散斑干涉测量技术。由于它的实时显示、高灵敏度、全场测量等特点,在工业无损检测中得到广泛的应用。

1974年Pedetsen等把硅靶摄像管作为光电探测头应用在ESPI中,提高了ESPI系统对光的灵敏度。1976年Lokberg等把全息干涉术中的参考光位相调制技

术引入电子散斑,使之能测量振动的位相分布;1977年, Wykes 讨论了电子散斑干涉法中的去相干效应,并提出了相应的改进措施;1978年, Jones 等利用双波长电子散斑干涉法测量了物体的轮廓。这样,几乎用了十年的时间,人们完成了对电子散斑技术的基本原理和它的性质的研究,提出了改善 ESPI 条纹质量的系统参数选取方法,为以后的研究和应用打下了基础,并研制了商品化的 ESPI 干涉仪。

进入 80 年代后,由于计算机技术、电子技术的飞速发展,出现了集成化的电子存储模块。利用这种技术,电视图像可以以点阵的形式量化为数字量存储在帧存体中,并可以读出和写入。把这种技术应用在电子散斑干涉中,就出现了数字散斑干涉术 (digital speckle pattern interferometry, DSPI)。1980 年 Nakadate 首先实现并得到 512×512 阵列的数字散斑干涉条纹,从而开始了采用数字处理方法的 DSPI 的发展。但直到 1984 年, DSPI 才由 Creath 正式提出并作为一种新技术加以推广,并且把微机和图像采集卡引入图像处理系统,取代了原始的大型数字图像处理系统,从而为以后的广泛应用奠定了基础。1987 年, Wykes 等使用了小功率激光器和半导体激光器实现了电子散斑干涉术,从而使系统更加紧凑、实用。伍小平等^[26]对空间散斑运动规律进行了系统研究,给出了严格的理论公式,发展了部分相干光散斑干涉的统计分析方法。

这一时期先后发展了相移 ESPI(phase shifting ESPI, PSESPI) 和载波 ESPI(carrier ESPI, CESPI)^[2,3,27]。这两种技术在 ESPI 干涉场中引入相移器和载波装置,可直接通过相位解缠 (Phase Unwrapping, 国内在实验力学领域亦称为相位解包裹,本书通称为相位解缠) 处理获得干涉场全场的连续相位分布,进而由相位位移关系得到位移分量。日本的 I.Yamaguchi^[28] 和美国南卡罗莱纳大学的 W.H.Peter 和 W.F.Ranson^[29] 等同时提出数字散斑相关方法 (digital speckle correlation method, DSCM), 对变形前后采集物体表面的两幅图像 (散斑场) 进行相关处理,以实现物体变形场的测量。它与前述干涉测量相比具有光路简单、要求测量环境低等优点。为了进一步提高 ESPI 的抗震性能, Hung^[30] 提出将剪切技术引入电子散斑的设想,并发明了电子散斑剪切干涉术 (electronic speckle pattern shearing interferometry, ESSPI)^[8]。

进入 90 年代后,计算机速度的大幅度提高,使得整幅图像可以以视频速率进行数字化存取和运算。相应地, DSPI 的测量速度大为提高,无须用模拟电子系统进行图像比较即可实现待测信息的实时显示。和电子散斑相比,数字散斑通过把物体变形前后的散斑图像量化为数字图像,由计算机用数字图像处理的方法对它进行运算,在计算机监视器上显示散斑干涉条纹图,从而减少了电子散斑中的噪声,提高了干涉条纹的清晰度,并可进行自动定量分析。鉴于 ESPI 技术的迅速发展和它在科学和工程应用中的重要影响, SPIE(The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers) 在 1996 年就 ESPI 专门出了一本里程碑式的文集,收集了 68 篇在 ESPI

原理和应用方面具有重要影响的论文,并建议为了纪念早期研究者的贡献,将 TV-Holography, DSPI 和 Electro-Optic Holography 等统称为 ESPI^[31]。本书中的 ESPI 沿用了这一定义。

1.2.2 ESPI 图像处理方法综述

干涉条纹图具有周期性分布、噪声与相位信号混叠、相位是缠绕的等与其他图像不同的特殊性,使条纹图像处理、分析方法与其他图像处理方法有较大的不同,形成了相对独立的体系,有许多不同的方法和算法。这里我们主要对与本书内容相关的条纹图数据处理方法进行综述。

1.2.2.1 条纹方向和条纹密度估计

干涉条纹图是一种方向流场,具有明显的方向性特征。条纹方向相对于条纹灰度或者梯度等信息来说,是一个变化比较缓慢的信息量,这便使得提取条纹方向信息来为条纹图其他处理提供指导成为可能。条纹方向既是干涉条纹图的重要特征,又包含着干涉条纹图自动处理所需的重要信息。

现在已经有很多种条纹方向图的求取方法。1988 年作者早期提出了基于旋转的方法,从 8 个或 16 个离散方向中选取灰度均方差最小的方向为条纹方向。这种方法得到的条纹方向精度有限。后来,作者对这种思想做了进一步改进与拓展,提出可求取任意条纹方向的平面拟合方法。梯度方法是求取方向图最为简单和常用的方法之一,Zhou Xiang 等提出对条纹图先进行高斯滤波,然后在滤波后图像上求 x 和 y 方向的梯度,最后在窗口内对梯度矢量做平均来求出条纹方向。此外,M. Servin 等还从统计滤波的角度提出了基于代价函数的方法,Daniel Crespo 等对此方法进行了改进,提出了快速算法。相对于 ESPI 及 InSAR 干涉条纹图,在手指纹图像处理中对方向图也进行了深入的研究。除了常用的梯度算法,P. Vizcaya 等应用基于模型的算法来求指纹条纹方向,C.L. Wilson 等则应用二维频谱分析来得到指纹条纹方向。

条纹密度也是条纹的重要信息之一。目前大多数条纹图处理方法都在尺寸预先设定的矩形窗口内进行计算,而实际测量中的条纹密度经常是不断变化的,当条纹密度与窗口尺寸严重不匹配时,可能会明显影响条纹处理的结果。所以条纹密度的估计对于提高条纹图自动处理能力和其实际应用水平具有重要意义。Olov Marklund 提出了基于模型和傅里叶变换的用于相位条纹图的条纹密度和条纹方向的估计方法。Chenggen Quan 等也实现了利用小波变换来估计条纹密度。

1.2.2.2 ESPI 干涉条纹图的生成及去噪方法

在 ESPI 处理过程中,可用多种干涉模式生成散斑干涉条纹图,通常用减模式来生成条纹图。由于消除了背景光强的影响,用减模式生成的条纹图比用加模式^[32]和相乘模式生成的条纹图对比度要高。然而,不论用那种模式生成的干涉条纹图都

不可避免地含有高水平的乘性散斑噪声,甚至许多散斑条纹图的信噪比近似为1,以至于许多学者提出质疑^[33]:散斑条纹图到底是信号还是噪声?散斑条纹图的极端高噪声水平使得高可靠、高精度地处理散斑条纹图变得极为困难,限制了散斑干涉法的工程应用。如何最大限度地消除条纹图像中的散斑噪声、高精度提取相位场是国际上研究的一个热门领域^[34~41]。

传统的滤波方法,如中值滤波、均值滤波、傅里叶变换滤波^[42,43]等,在滤掉图像中散斑噪声的同时,也会滤掉、模糊许多有用的信息。尤其在处理内部有明显边界的散斑条纹图时,会造成边界的模糊,从而给测量结果带来误差。戴嘉彬^[44]等提出线性窗口加权邻域平均算法,由于是单点进行,对于较大的斑点,滤波效果不太理想。何小元等^[45]提出一种复合区域平均法。A.Davila等^[46]提出尺度空间滤波算法,在滤除噪声的同时可以保持条纹的边缘信息,P.D.Ruiz等^[47]对这种方法进行了详细的评价。也有许多人将小波分析方法用于 ESPI 条纹图的去噪处理^[48~51]。作者提出的旋滤波 (spin filter) 算法^[52~56]可以较好地滤除条纹图的噪声,同时又不损伤条纹特性。在此基础上发展的曲面大窗口滤波方法^[57~63]是现在国际上滤除散斑条纹图噪声的比较理想的方法。这是本书将要介绍的等值线窗口滤波法的早期版本。

1.2.3 ESPI 相位主值图的去噪方法

相移法是条纹图处理研究领域中最重要的发展和成果之一。由于相移法具有很好的实用性,目前国际上在条纹图处理实际应用中,若能满足相移法的条件则大都采用相移法。但相移法获得的相位图仅仅是相位的缠绕主值图 (saw-tooth phase map), 值域为 $(-\pi, +\pi]$ 。要得到连续的相位图,必须经过解缠处理,其原理非常简单。但实际的 ESPI 相位主值图含有大量的噪声,使得解缠处理面临许多问题和困难,是条纹图处理中面临的最大挑战之一。

在对相位主值图进行解缠处理前,一般先要对其进行去噪处理。中值滤波及均值滤波不能直接用于相位主值图的去噪处理,它们会严重损害主值图的跳变信息。Capanni等^[64]提出了一种改进的中值滤波方法,其基本思想为:对滤波窗口内的灰度信息统计其直方图,并根据直方图来判断滤波窗口与相位跳变线的位置关系,进而选择滤波窗口内的全部信息或部分信息来得到最后的滤波结果。该方法可以较好地保持相位跳变信息,但同时也存在误判现象。Huang等^[65]对这一方法进行改进,将直方图划分得更为细致。Qian等^[66]提出窗口尺寸可变的 Capanni 滤波方法。作者提出了带门限旋滤波方法^[67]。Aebischer等^[68]提出 sine /cosine 滤波方法:先将主值图通过正弦及余弦运算分解为两幅图像,然后对其分别用均值滤波去噪,最后再求反正切得到滤波结果。实验表明,该方法简单、滤波效果好、能有效去除主值图中的不一致点,且能保持相位跳变信息。正余弦滤波方法避免了主

值相位图中的 2π 跳跃, 使许多针对余弦条纹图的滤波方法可以在正余弦滤波的操作思路下, 对主值相位图进行滤波。现在这已是对主值相位图较通用的一种处理过程。Palacios 等^[69] 提出将 sine/cosine 滤波与掩膜滤波技术相结合的方法。

1.2.4 ESPI 的相位测量方法

前面提到, 相移法是目前国际上对散斑条纹图处理较成功和成熟的方法^[38,39,70]。但相移法通常需要 3 幅以上带有不同相移场的条纹图, 这个基本要求使其无法应用于冲击、振动等许多动态试验中。同时相移法需要精密的移相装置, 移相本身也带来一定的误差。因此研究如何从单幅散斑条纹图中可靠地、高精度地提取相位场, 仍有着重要的理论与实际应用价值。目前主要方法有傅里叶变换法^[71,72]、余弦变换法、同步相位法^[73]、解调与卷积算法。但傅里叶变换法对条纹密度变化不大的条纹图较适用, 同步相位法只能对条纹质量较好的全息图进行处理, 难以处理噪声较大的散斑图像。作者提出了基于免除噪声正则化条纹图的单幅相移法^[74]。Marroquin 等通过计算条纹局部频率及局部方向实现了从单幅条纹图恢复相位的目的^[75~78]。杨福俊等实现了类似的方法^[79,80]。Robin 等^[81] 提出一种基于数学模型相关方法的单幅条纹图处理方法。

1.3 InSAR 的发展及其图像处理方法概述

1.3.1 InSAR 的发展

InSAR 是一个交叉性很强的新领域, 涉及对地观测、电磁波传播、信号处理、影像处理与模式识别、空间大地测量和数字摄影测量等多个领域^[82]。目前和今后一段时间里, InSAR 技术仍然是非常活跃的研究领域, 进一步研究发展的空间很大。但是, 从初始的 InSAR 影像对到提取地面高程信息或地表形变信息的数据处理过程, 包含许多环节, 欲使之形成成熟的技术体系, 仍有许多关键问题有待研究或亟需进一步完善^[15]。例如, 重复轨道干涉模式下单视复数影像的高精度自动配准 (co-registration), 地形变化剧烈或有植被覆盖区域的去相关 (decorrelation) 引起的相位噪声, 复杂地形条件下的相位解缠等问题均需进一步解决。这里主要是指星载 InSAR。这些问题或者是由于 SAR 所特有的成像方式引起的, 或者是由干涉测量机理所引起。这些问题的存在使得 InSAR 实施过程中对系统参数、运行轨道和数据处理等各个方面的要求异常严格, 严重地阻碍了 InSAR 技术的进一步推广应用。

InSAR 数据处理的核心算法包括 SAR 图像配准、干涉相位图的生成和滤波、相位解缠、干涉基线参数确定或估计等^[83]。为适应 InSAR 应用的需要, 国际上一些研究机构或公司已经开发出了多种商业软件包^[84], 处理数据源主要是卫星 SAR

数据,包括 ERS-1/2、JERS-1、RADARSAT 和 ENVISAT 等获取的数据。目前,这些软件仍处于非成熟期,软件算法、功能和用户界面仍需进一步优化和改善。较有影响力的四大商业软件包是:(1) 加拿大 Atlantis Scientific 公司发布的 Ev-InSAR 软件包;(2) 德国斯图加特导航研究所发布的 PCI 软件包中的干涉模块;(3) 瑞士苏黎世遥感研究所和美国 JPL 联合发布的 Gamma 软件包;(4) 奥地利格拉茨的 Joanneum 研究所开发的 InSAR 模块已融合到著名遥感应用软件 Erdas IMAGE 里面。此外,荷兰 Delft 大学空间研究中心已开发出基于 Unix 操作系统的 Doris InSAR 软件,可免费下载使用。

近几年来国内也有许多学者致力于 InSAR 技术的研究和应用推广^[85~88],在国家“十五”期间更是列入了多个学科的优先研究领域,相应的传感器研制计划也已经启动。但是,数据获取与处理技术手段的发展相对国际先进水平仍然滞后,InSAR 的数据处理几乎完全依赖昂贵的进口软件,难于满足雷达遥感技术推广应用和国家的信息产业发展战略以及国防建设的迫切需要^[15]。因此,只有结合雷达遥感领域国际前沿的发展趋势,加强 InSAR 技术及其数据处理的关键技术研究和技术创新,积极推动我国自主产权的数据处理软件方法研究和平台开发,实现跨越式发展,才能适应未来对雷达对地观测技术发展的要求。

1.3.2 InSAR 图像处理方法综述

1.3.2.1 InSAR 干涉相位图的去噪方法

在 InSAR 数据处理过程中,由初始的单视复 (single look complex, SLC) 图像对来提取地面高程信息,包括许多关键环节。其中,在对干涉相位图进行解缠运算之前对其高强度斑点噪声进行滤波处理,以降低噪声对二维相位解缠算法效率、可靠性和精度的影响,是关键的处理步骤之一。

对 InSAR 干涉相位图进行滤波处理的最简单方法就是在复数域对其进行均值或中值滤波。在复数域滤波等同于前述的正余弦变换过程。目前,欧洲空间局和 JPL 等公开发布的处理软件中仍然采用这一简单快捷的滤波方法^[15]。Rodrigues 和 Martin 提出了一种基于多视处理的滤波方法^[89]。先用多视的方法,分别求出 N 个 SAR 复图像对,再用各对复图像分别做干涉,对 N 个干涉结果的实部和虚部求和,最后对虚部和实部和的比值取反正切,得到滤波结果。J.S.Lee 等提出了一种基于局部坡度的自适应滤波方法^[90]:在条纹密集的地方取较小的滤波窗口,条纹稀疏时取较大的滤波窗口;在条纹图上,采用与作者的旋滤波类似的 16 个不同方向窗口沿条纹方向进行滤波。由于考虑了条纹方向性的特点,该方法取得了较好的滤波结果,被较多地采用。E.Trounev 等^[91]以类似的思想结合局部坡度的估算来解决去除噪声的问题,其自适应的思路与 J.S. Lee 的算法基本相同。Nan Wu 等^[92]提出一种 J.S.Lee 滤波算法的改进方法:通过局部频率估计求出条纹的法线方向,并据

此构造方向性的滤波窗口,窗口方向为条纹切线方向。和 J.S. Lee 的算法相比,它不需要局部解缠,且窗口方向也不再限于 16 个方向。上述研究都利用了条纹方向信息,在条纹切线方向直线窗口上滤波。但当条纹曲率大和密度大时,这种条纹切线窗口不能很好地近似条纹等直线,滤波仍会产生模糊效应。作者等在早期提出的用条纹切线窗口的旋滤波的基础上,进一步利用条纹方向信息,建立严格条纹等值线窗口^[93],提出了 InSAR 干涉相位图的等值线滤波方法。该等值线滤波方法将在本书中详细介绍。

R.M. Goldstein 等^[94]提出的功率谱滤波方法是一种简单且有效的方法。其他常用滤波方法还包括圆周期滤波等^[95]。廖明生等^[96]从干涉成像机理出发提出了一种中值-自适应平滑滤波方法,避免了估计局部地形的复杂计算,且获得了较为满意的去噪效果。朱岱寅等^[97]提出一种基于局部空间频率估计的滤波器,它能依据地形变化进行参数调整,能够有效地克服传统多视滤波器破坏致密干涉条纹的缺点。

1.3.2.2 InSAR 复图像对的配准方法

在 InSAR 数据处理中,复图像对的精确配准技术是提高地表高程测量精度的关键因素之一,通常要求把两幅相干复图像配准到亚像素精度。重复轨道的 SAR 图像对的配准中,在两轨道平行的情况下,图像的偏差在方位向上有相同的大小和方向;而在距离向上,由于图像成像时对同一目标的入射角不一致,对地面点的成像上存在一定的偏差。

在进行两幅复图像的配准过程中,评价配准质量的指标主要有 3 个:(1) 两幅 SAR 复图像的相干系数^[98];(2) 两幅 SAR 复图像的相位差图像的信噪比^[99];(3) 两幅 SAR 复图像的相位差图像的平均波动函数^[100]。

廖明生等^[101]提出的结合最小二乘匹配的多级匹配方法较好地解决了效率、精度和可靠性等问题。云日升等^[102]通过对干涉相位误差的统计特性研究,分析了 InSAR 配准精度与干涉相位误差之间的关系。陶鹏等^[103]提出以残余点(residual)的数目作为衡量干涉复图像整体配准质量的定量尺度,可以减小 DEM 中因配准精度欠佳所引起的误差。

1.3.2.3 InSAR 干涉相位图的解缠方法

ESPI 相移方法和 InSAR 数据处理过程需要共同面对的一个技术难点就是相位解缠或称相位展开。从干涉条纹图中得到的相位差实际上只是主值,其取值范围在 $(-\pi, +\pi]$ 之间,要得到真实的相位差必须在这个值的基础上加上或减去已经失掉了的 2π 的整数倍,这个过程称为相位解缠^[15]。在没有噪声和其他干扰的理想情况下,可以先提取相位的偏导数,然后通过一个简单的积分运算反演出真实的相位差。但实际情况经常是:条纹较为密集,去相干噪声严重,这使得相位解缠变得困