

蒋 弥,李志伟,丁晓利等. InSAR 可检测的最大最小变形梯度的函数模型研究. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1715~1724, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.006

Jiang M, Li Z W, Ding X L, et al. A study on the maximum and minimum detectable deformation gradients resolved by InSAR. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(7): 1715~1724, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.006

## InSAR 可检测的最大最小变形梯度的函数模型研究

蒋 弥<sup>1</sup>,李志伟<sup>1\*</sup>,丁晓利<sup>2</sup>,朱建军<sup>1</sup>,冯光财<sup>2</sup>,尹宏杰<sup>1</sup>

1 中南大学信息物理工程学院,长沙 410083

2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系,香港 九龙

**摘 要** InSAR 干涉图中的相位噪声是相干性和视数的函数. InSAR 能检测的地表最大最小形变梯度,除了受到 InSAR 硬件的限制外,还直接受到 InSAR 干涉图中噪声强弱的影响.此外,由于多视处理会改变像元的大小,也会引起可检测的最大最小形变梯度显著变化.本文研究了 InSAR 可检测的地表最大最小形变梯度与相干性和视数的关系,并建立了视数为 1、5 和 20 时(ERS 和 ENVISAT 常采用的多视数)InSAR 可检测的最大最小形变梯度的经验函数模型.最后,本文用伊朗 Bam 地区的 Envisat ASAR 数据进行了试验,结果表明该模型能够准确地判别不同视数和相干性情况下地表变形能否被 InSAR 技术所检测.与 Baran 只考虑了相干性的模型相比,本文的模型适用范围更广.

**关键词** 合成孔径雷达干涉测量, Bam 地震, 形变梯度, 相干性, 视数, Envisat ASAR 传感器

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.07.006

中图分类号 P223

收稿日期 2008-12-11, 2009-06-02 收修定稿

### A study on the maximum and minimum detectable deformation gradients resolved by InSAR

JIANG Mi<sup>1</sup>, LI Zhi-Wei<sup>1\*</sup>, DING Xiao-Li<sup>2</sup>, ZHU Jian-Jun<sup>1</sup>,  
FENG Guang-Cai<sup>2</sup>, YIN Hong-Jie<sup>1</sup>

1 School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

2 Dept. of Land Surveying & Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

**Abstract** The phase noise in a SAR interferogram is the function of both interferometric coherence and multilook number. In InSAR, except the hardware limitation, the maximum and minimum detectable deformation gradients are directly affected by interferometric phase noise. In addition, multilook operation will alter the size of pixels and thus the maximum and minimum detectable deformation gradients. This paper investigates the relationship among the maximum/minimum detectable deformation gradient, the multilook number and the coherence, and establishes the empirical function models of the maximum/minimum detectable deformation gradients for multilook number 1, 5 and 20. Experimental results with Envisat ASAR data over the area of Bam, Iran show that the new models can accurately judge whether a given ground

**基金项目** 国家自然科学基金项目(40774003, 40404001), 国家 863 项目(2006AA12Z156), 教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-08-0570), 国家西部 1:50000 空白区测图工程 2007 年度研究课题, 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放基金(200817)资助.

**作者简介** 蒋 弥,男,1982 年生,硕士研究生,研究方向为 InSAR 和 D-InSAR 算法及其在形变监测领域的应用.

E-mail: mail.jiangmi@gmail.com

\* 通讯作者 李志伟,男,1974 年生,教授,主要从事 InSAR 研究. E-mail: zwli@mail.csu.edu.cn

deformation can be resolved by InSAR. Comparing with the model incorporating only coherence information, the new model is more accurate and comprehensive.

**Keywords** Interferometric synthetic aperture radar (InSAR), Bam earthquake, Deformation gradient, Coherence, The look number, Envisat ASAR Sensor

## 1 引言

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)目前已经被广泛应用于生成数字高程模型及监测地表变形<sup>[1~5]</sup>. 地表运动引起的变形在 InSAR 干涉图中表现为一系列干涉条纹,每一个条纹( $2\pi$  相位)对应的视线方向的变形为雷达波长的一半. 以 Envisat ASAR 传感器为例,雷达波长为 5.66 cm,每个条纹代表 2.83 cm 的变形.

1992 年,Zebker 等<sup>[6]</sup>系统地阐述了干涉测量能够顺利进行的基本条件,并指出同一分辨单元对应的物体在成像期间沿雷达视线像发生的位移形变超过半个波长,这些形变就无法从 InSAR 干涉图中恢复. 以此为依据,Massonnet 等<sup>[7]</sup>给出了 InSAR 可检测的最大形变梯度的理论公式,即雷达波长的一半与像元边长的比.

根据定义,最大形变梯度是一个无量纲的值,不同的传感器可监测的最大形变梯度值存在较大的差异. 以 Envisat 和 JERS 传感器为例,经多视处理后可检测的最大形变梯度分别为  $1.4 \times 10^{-3}$  (5 视,像元分辨率约为  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ) 和  $6.5 \times 10^{-3}$  (3 视,像元分辨率约为  $18 \text{ m} \times 18 \text{ m}$ ),长波段的传感器在理论上具有监测更大形变梯度的优势. 然而由于热噪声、时间去相干、空间去相干以及大气等因素的影响,InSAR 干涉图中常存在大量的噪声,破坏了形变相位信息,使实际中 InSAR 能检测到的最大形变梯度远小于理论值.

为此,Baran 通过模拟实验研究了 InSAR 可检测的形变梯度与相干性的关系,经验性地建立了以相干性为自变量的最大形变梯度函数模型,并提出最小形变梯度的概念<sup>[8]</sup>. 然而,仅基于相干性建立的最大最小形变梯度模型仍存在严重缺陷,因为理论上相位噪声是相干性与视数的函数<sup>[9~11]</sup>,相干性相同而视数不同时干涉图相位噪声可以出现显著差异. 如当相干系数为 0.5、视数分别为 1 视与 20 视时,理论相位标准偏差相差近 3 倍<sup>[12]</sup>,这一结果直接影响了 InSAR 能够检测到的地表形变大小,进而导致已有的形变梯度函数模型估算不准确. 另外,由

于多视处理还会改变像元的大小,也会引起 InSAR 可检测的最大最小形变梯度显著变化.

基于上述分析,同时考虑到当前形变梯度预测模型在结合视数和相干性两个参数的研究方面还没有报道的现状,本文在分析干涉视数对 InSAR 形变量提取影响的基础上,深入研究了 InSAR 可检测的最大最小形变梯度与相干性  $\gamma$  和视数  $L$  的关系. 由于欧洲空间局 ERS-1、ERS-2 和 Envisat 雷达数据常常采用视数  $L=1,5$  和 20 进行处理,本文将相应地建立视数  $L=1,5$  和 20 时的 InSAR 可检测的最大最小形变梯度经验模型. 同时,采用真实数据对模型进行验证,并与现有模型的估算结果进行了分析比较.

## 2 干涉视数对 InSAR 形变量提取的影响

在 SAR 成像区域发生剧烈的地表形变情况下(如火山、地震等),干涉图中将表现出一系列紧密的干涉条纹,当影像采样率不能满足 Nyquist 采样定理的要求时,就很容易引起干涉相位混叠现象<sup>[13]</sup>. 然而,以降低空间分辨率为代价换取噪声减弱的多视处理在减小相位噪声的同时必然加快紧密条纹的混叠,从而降低形变量的提取精度. 换言之,现有预测模型的估算结果因过度的多视处理而出现差异. 为论证上述论断的正确性,本节采用模拟数据(未考虑各种去相干因素和大气影响)进行定性分析.

沉降模型根据二维高斯密度函数分布特征进行模拟,并利用 Envisat ASAR 传感器的参数得到形变相位;在相位噪声模拟中,令  $\sigma_p = 0.75$ ,  $\phi_0 = 0$ ,将加噪的干涉图分别进行距离向 2、3 视的多视处理,然后采用费用流解缠方法将多视前后的 3 幅加噪干涉图进行相位解缠,最后分别取图 1a 中的相应剖面(白色实线),得到由剖面数据绘制的散点图 1b.

分析图 1 的结果可以看出,没有经过多视处理的干涉图在解缠后相位值仍然逼近真实相位,只是受弱噪声影响在局部出现较小的偏差. 而 2 视处理后的相位虽然在整体上能够反映真实相位,减小了相位噪声,但在第 16 个像素处相位值出现了较大浮

动. 经 3 视处理后的解缠相位已经远远偏离了真实值, 其主要原因是由于 3 视处理在改变像元大小的同时, 也引起干涉图的相位混叠, 进而导致解缠误差增大. 定量计算结果(在计算中剔除了第 16 个像素)显示, 1、2 和 3 视情况下相位的 RMS 值分别为 0.8238 rad, 0.6107 rad, 3.9638 rad. 该结果表明多视处理的确能够减小相位噪声, 有利于形变提取, 但视数的选取不当又很容易引起解缠误差的急剧增加, 特别是在形变梯度较大的区域, 略微的增加视数都会引起干涉相位混叠现象发生, 从而降低了 D-

InSAR 可检测的最大形变梯度. 因此, 在基于相干性的形变梯度模型中增加干涉视数才能更准确地反映实际情况, 使得模型预判结果更可靠.

### 3 考虑视数形变梯度函数模型的构建

#### 3.1 研究方法

本文基于经验统计的思想来分析和表达视数、相干性与形变梯度的关系, 图 2 概述了本文的技术路线.

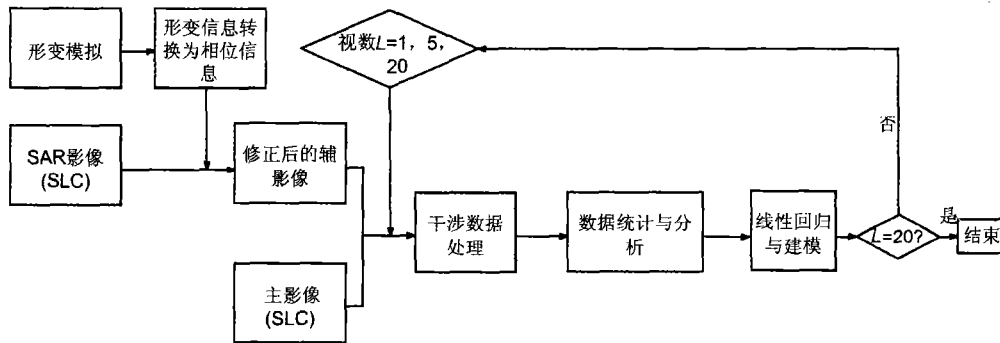


图 2 研究方法流程图

Fig. 2 Flowchart for proposed methodology

根据文献[14], 数据处理引起的去相干因素也是相位噪声的来源之一. 因此本文将模拟相位直接引入原始影像. 这种方法确保所有的去相关因素都被充分考虑. 这样, 干涉复随机信号可以表示成:

$$e^{i\phi_{def}} e^{i\phi_{topo}} e^{i\phi_{noise}} e^{i\phi_{flat}} e^{i\phi_{def\_sim}} e^{i\phi_{atmos}}, \quad (1)$$

其中,  $\phi_{def}$ ,  $\phi_{topo}$ ,  $\phi_{noise}$ ,  $\phi_{flat}$ ,  $\phi_{def\_sim}$  和  $\phi_{atmos}$  分别表示地表变形、地形、噪声、平地效应、模拟的地表变形和大气相位.

为了仅保留干涉图中的噪声和形变条纹, 本文在数据处理中采用 3 弧秒的 SRTM 数字高程模型 (DEM) 去除地形信息; 平地相位  $\phi_{flat}$  可以在干涉图生成之后计算部分像素值, 然后通过二项式拟合进行去除; 至于地面真实形变的去除, 一般情况下是非常困难的, 只能在形变模拟阶段选取地表无变形或变形非常小(条纹率低)的区域, 避免引入形变信息. 至此观测样本可以表示成:

$$e^{i\phi_{noise\_total}} e^{i\phi_{def\_sim}}, \quad (2)$$

其中总噪声  $\phi_{noise\_total}$  包括了大气和轨道引起的相位贡献值以及外部 DEM 引入的系统误差等. 若式(2)中的形变  $\phi_{def\_sim}$  能够在差分干涉图中得到恢复, 则表明该形变梯度的量级可以用 InSAR 技术探测到. 反之, 若条纹出现混叠或失相关现象, 我们认为

InSAR 不适合监测该等级的形变梯度.

#### 3.2 形变模拟和实验数据选取

地表运动引起的沉降变形可以利用具有二维高斯分布的概率密度函数进行模拟, 该方法在很多文献中都有详细的介绍[15~17]. 在本文的研究中, 令随机变量  $x, y$  不相关, 期望值均为 0. 通过调整标准差  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  改变变形的空间范围, 以因变量  $f(x, y)$  的倍数控制形变振幅大小. 在数据分析阶段, 本文进行了两组形变模拟, 模拟的参数如表 1 所示.

为考察不同相位噪声对条纹的影响, 选取的实验数据和实验区域的相干性应该有较强的代表性, 既有高相干性区域, 也有低相干性区域. 同时, 为了更好地去除地形误差的影响, 应选取基线较短的 SAR 干涉数据. 据此, 我们选取覆盖 Bam 地区时间跨度为 70 天的降轨 SAR 影像作为实验数据, 其基本参数情况如表 2 所示, 覆盖范围见图 3a.

从图 3a 可以看出, Bam 地区的地形复杂, 海拔较高. 为此本文选取垂直基线约为 14 m 的干涉对来降低相位对高程的敏感度. 数据处理中采用了 Delft 大学的精密轨道数据和 3" 分辨率的 SRTM 数据进行辅助. 图 3b 给出了处理后的差分干涉图. 可以看出, 除断裂带(黑色实线)附近的地表发生了较

表 1 形变模拟参数  
Table 1 The parameters of the deformation simulations

模型编码	I 组							II 组						
	A1	B1	C1	D1	E1	F1	G1	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2
形变量 (mm)	3.5	7	11	28	56	84	112	3.5	7	14	28	56	70	84
条纹数	1/8	1/4	1/2	1	2	3	4	1/8	1/4	1/2	1	2	5/2	3
方位向/距离向(m)	960×480							480×280						

表 2 SAR 影像基本参数  
Table 2 Basic parameters of SAR images

影像	传感器	获取日期	轨道号	Track	影像中心经纬度	垂直基线
主影像	ENVISAT ASAR	2003-12-03	09192	120	29.01°N/58.08°E	14 m
辅影像	ENVISAT ASAR	2001-0-211	10194	120		

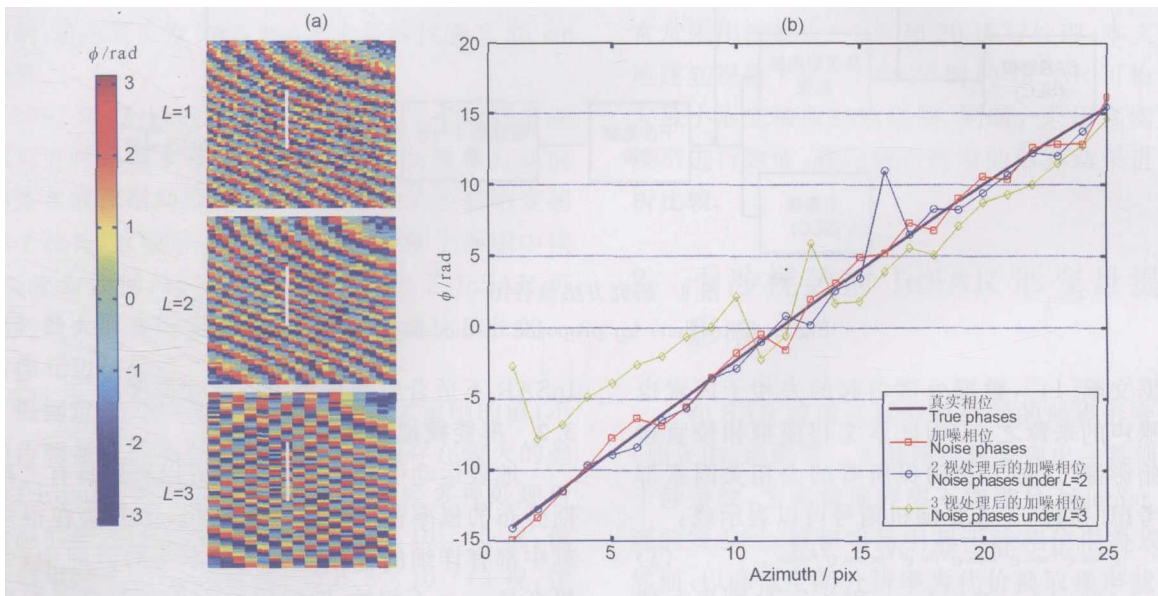


图 1 模拟差分干涉图(a)及其相位解缠后的相应剖面(b)

Fig. 1 The simulated differential interferograms (a) and their unwrapped profiles (b)

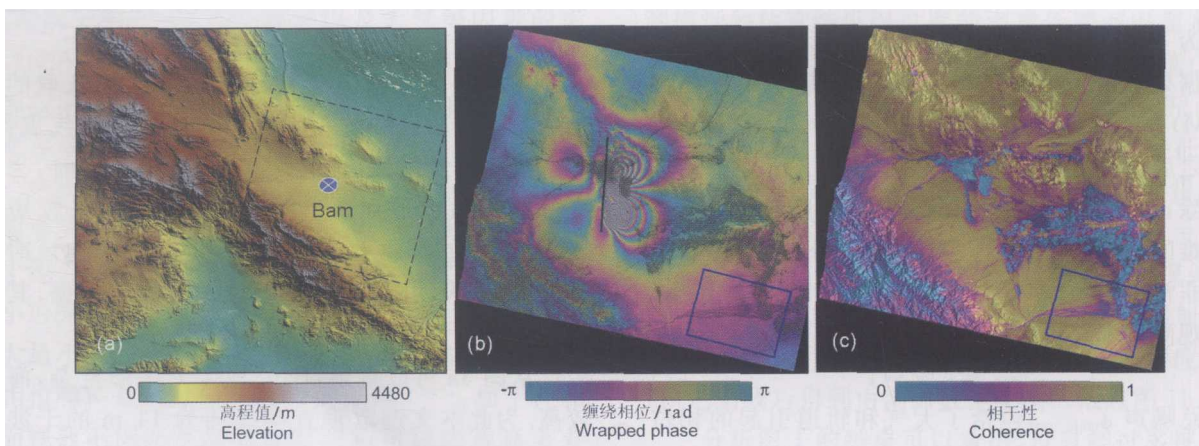


图 3 研究区概况

(a)SAR 地理位置(Track : 2120 ; Frame : 3015)及 Bam 地区高程分布;(b)Bam 差分图及断裂带;(c)相干图.

Fig. 3 The profile of study area

(a) Geographical location(Track : 2120;Frame : 3015) and elevation of the region surrounding Bam;

(b) The differential interferogram and the fault ruptured by the earthquake; (c) Coherence map.

大形变外,其他地区的地表位移较小(不到半个条纹)或几乎无变形.根据本文要求研究区域噪声差别较大和试验区无形变信息等特点,图 3c 中蓝色矩形所覆盖的区域是较为理想的选择.

下面将针对所选区域进行实验分析,采用目视解译的方法检测形变条纹的可见度.虽然这种判读方法会对统计的模型带来一定的误差,但是目前还没有一种机器判读标准对条纹可见度进行自动识别.

### 3.3 模拟数据分析

如 3.2 节所述,本文模拟了 2 组沉降模型(一组 7 个),每个沉降模型都对应了惟一的形变梯度(A1 为  $3.5 \times 10^{-3}/240$ ,A2 为  $3.5 \times 10^{-3}/140$ ).在处理修正后的 SLC 影像之前,我们首先对真实影像做一次单视干涉处理,其目的是通过生成的相干图寻找 20 个相干性不同的区域.然后以这些位置为参考,逐个将模拟的相位一次性放入原始影像中 20 个不同的位置.最后再对新的 SAR 干涉图做两轨差分,按照编号的顺序重复上述步骤 14 次可以得到 280 个样本(14 个梯度值 $\times$ 20 个不同区域),在三个视数下分别循环一次就能一共得到 840 个观测值.数据分析的方法便是对每个视数下的样本(280 个)进行一次统计,然后根据统计结果建立一个基于相干性的形变梯度函数模型.基于篇幅考虑,本文只列出两组观测显示于图 4 和图 5 中.

图 4 主要揭示了视数  $L=1$  时相干性与形变梯度的关系,覆盖区的相干值在 0.4~0.8 之间.从图中可以看出,在同一相干均值区域(行方向),随着形变量的增加,条纹的轮廓更加清晰,条纹数却逐渐模糊.以相干性均值 0.49 为例,当形变量等于 1/2 条纹(模型 C1)时,干涉图中条纹轮廓没有形变为 1 个条纹(模型 D1)时清楚,当形变增加到 4 个条纹(模型 F1)时,轮廓更清楚,但条纹数不易辨认.相对同一形变量(列方向),随着相干值增加,条纹数逐渐清晰,噪声对条纹的破坏程度减小,在均值 0.80 的情况下,所有模型都清晰可见.当均值小于 0.40 时,几乎所有的模型都无法识别.

图 5 则反映了在同一研究区域干涉视数与形变梯度的关系.可以看出,就同一区域而言,总体上多视后的干涉图远比原始影像清晰,条纹数更易辨认.对于条纹稠密的模 F1 和 G1(红色虚线),20 视的多视处理破坏了原有的形变信息并引起条纹混叠现象.相比之下 5 视的处理结果较好,在降低噪声的同时尽量维持了原有的相位信息.而形变梯度较小的模型 B1~D1,较大的视数更有助于降低噪声和形

变信息的保持.值得注意的是样本中相干系数随着视数的增大出现了衰减,其原因是多视处理后的相干性估计窗口对各像素的相干值估算产生了影响,窗口大小的不同引起相干性变化.例如,默认的估算窗口为  $5 \times 5$ ,则 1、5、20 视下相干值估计窗口分别为  $5 \times 5$ ,  $5 \times (5 \times 5)$  和  $(5 \times 2) \times (5 \times 10)$ ,1 视和 20 视相干性均值在同一区域相差了近 0.07.

采用上述类似方法,我们还模拟和分析了相干值跨度为 0.20~0.65 和视数为 1、5、20 等情况下的差分干涉图,在此区间的相干系数对后续建模起着至关重要的作用.

### 3.4 函数模型建立

#### 3.4.1 模拟结果统计

至此,我们得到了大量的观测样本,每个样本对应惟一的视数  $L$ 、相干性均值和形变梯度  $D$ .同时,根据目视判读准则,进一步确立了这些差分干涉图能否被 InSAR 检测到.本节将对这些结果进行统计,分别针对视数  $L=1, 5, 20$  三种情况,将判读结果扩展到二维( $\gamma, D$ )空间,其中能被 InSAR 检测的点用红色星号表示,不能检测到的点用蓝色圆点表示(图 6).

从图 6 可以看出,在不同视数下 InSAR 技术所能检测到的地表变形存在明显的差异.随着视数的增加,InSAR 可检测到的最大形变梯度逐渐减小.这是因为较大的形变梯度反映在干涉图中为非常密集的条纹,这种稠密的条纹在多视处理时遭到了破坏,即分辨率的降低引起了干涉条纹混叠现象.与此相反,对于较小的形变梯度,多视处理更有助于降低相位噪声,使得微弱的形变信息更容易被识别.

#### 3.4.2 函数模型建立

从图 6 可以看出,在 1、5 和 20 视下,InSAR 能检测到的最大最小变形梯度随着相干性的变化基本呈直线(即蓝色的圆点和红色的星号交界),据此我们将用线性函数来拟合.此外,我们还需要考虑 InSAR 技术本身的一些约束.首先,当相干系数  $\gamma=1$ ,即没有失相关时,InSAR 能检测到的最大形变梯度为每个像元不超过一个条纹(或半个波长):

$$D_L = \frac{\lambda}{2\mu_{L,\min}}, \quad (3)$$

其中  $\mu_{L,\min}$  为不同视数下像元最短边长.1、5 和 20 视时, $\mu_{L,\min}$  的取值分别为 4、20、40 m,则最大形变梯度分别为  $7.0 \times 10^{-3}$ 、 $1.4 \times 10^{-3}$ 、 $0.7 \times 10^{-3}$ .其次,根据文献[7],当  $\gamma=1$  时,可监测的最小形变梯度约为  $10^{-7}$ ,相当于在雷达影像 100km 的幅宽内

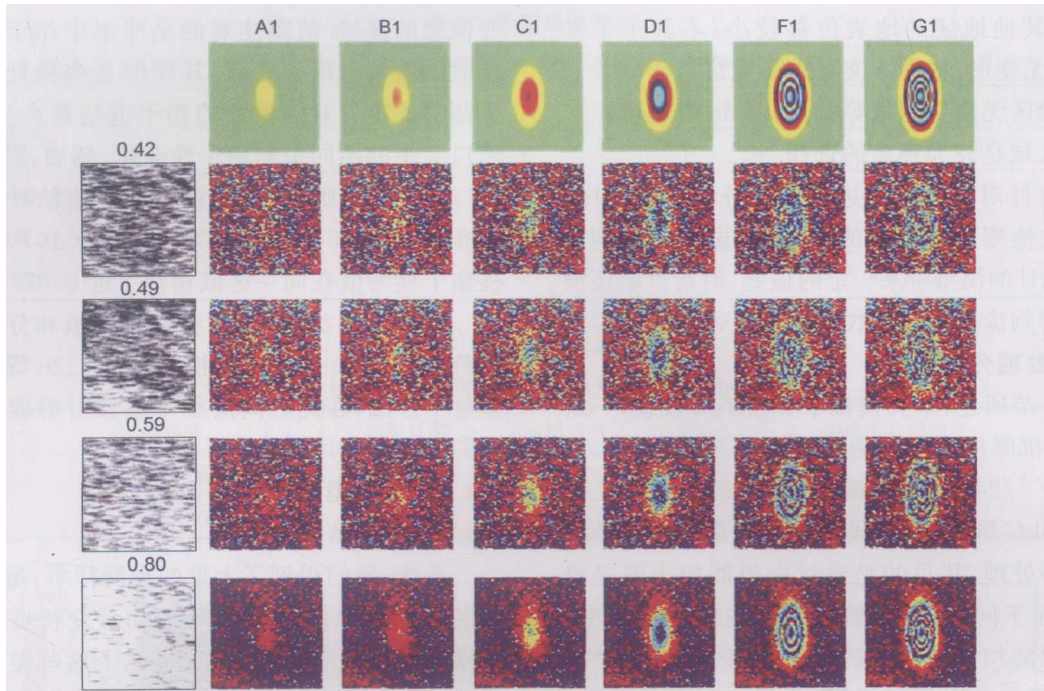


图 4 相干性对形变梯度的影响

视数  $L=1$ , 像元大小  $20\text{ m}\times 4\text{ m}$ , 形变空间范围  $960\text{ m}\times 480\text{ m}$ , 相干均值分别为: 0.42, 0.49, 0.59, 0.80.

Fig. 4 The effect of coherence on deformation gradient under look number  $L=1$

The pixel size is about  $20\text{ m}\times 4\text{ m}$ . The spatial extent of the simulated deformation is  $960\text{ m}\times 480\text{ m}$ , the mean values of the coherence are: 0.42, 0.49, 0.59, 0.80.

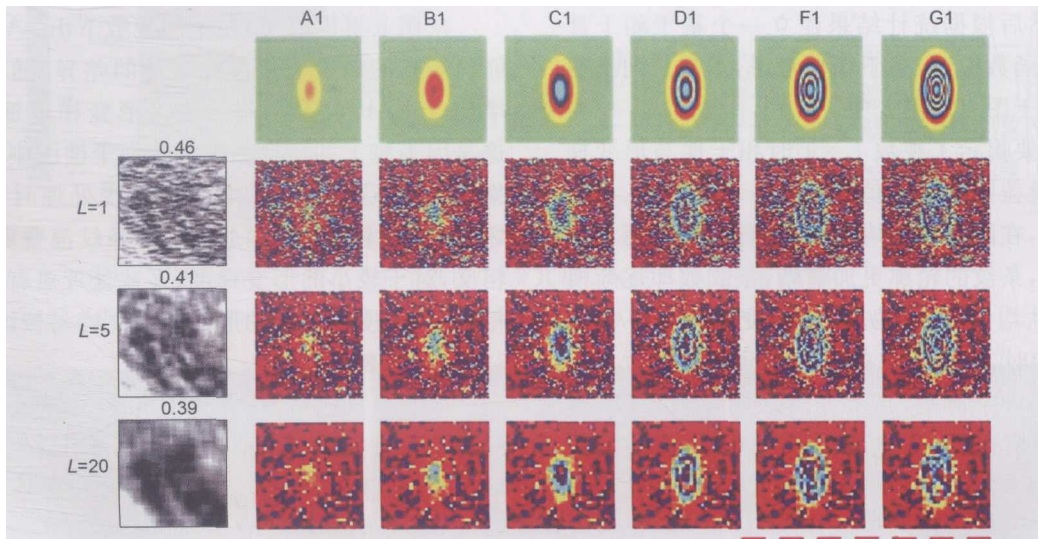


图 5 干涉视数对形变梯度的影响

视数  $L=1, 5, 20$ , 对应的像元距离向和方位向分辨率分别为  $20\text{ m}\times 4\text{ m}, 20\text{ m}\times 20\text{ m}$  和  $40\text{ m}\times 40\text{ m}$ , 形变空间范围  $960\text{ m}\times 480\text{ m}$ , 相干均值分别为: 0.46, 0.41, 0.39

Fig. 5 The effect of look number on deformation gradient

The pixel resolution is  $20\text{ m}\times 4\text{ m}, 20\text{ m}\times 20\text{ m}, 40\text{ m}\times 40\text{ m}$  respectively, for multilook number  $L=1, 5$  and 20.

The spatial extent is  $960\text{ m}\times 480\text{ m}$ , the mean values of the coherence are: 0.46, 0.41, 0.39.

发生 1 cm 的变形, 这是受 InSAR 技术本身限制的. 这个约束条件表明最大形变梯度函数模型必经过点  $(1, D_L)$ , 最小形变梯度函数模型必经过点  $(1, 10^{-7})$ , 因此新的线性函数模型可以定义为

$$\begin{cases} D_{\max_L}(r) = D_L + K_{\max_L}(r - 1), \\ D_{\min_L}(r) = 10^{-7} + K_{\min_L}(r - 1), \end{cases} \quad (4)$$

其中  $L=1, 5, 20$ ,  $D_{\max_L}$  和  $D_{\min_L}$  分别表示最大和最小形变梯度,  $K_{\max_L}$  和  $K_{\min_L}$  为最大和最小形变梯度的

斜率. 根据图 6 的统计结果和线性函数模型(4), 本文对最大和最小形变梯度模型的斜率  $K_{\max_L}$  和  $K_{\min_L}$  进行了回归分析, 考虑到形变梯度函数模型的实用性和简易性, 回归模型采用一元线性模型. 在此基础上建立了 1、5 和 20 视下 InSAR 可检测的最大最小形变梯度与相干系数的经验函数模型为

$$\begin{cases} D_{\max_1} = 0.0114(r-1) + 0.007 \\ D_{\min_1} = -0.000197(r-1) + 10^{-7} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} D_{\max_5} = 0.0020(r-1) + 0.0014 \\ D_{\min_5} = -0.000081(r-1) + 10^{-7} \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} D_{\max_{20}} = 0.0009(r-1) + 0.0007 \\ D_{\min_{20}} = -0.000034(r-1) + 10^{-7} \end{cases}. \quad (7)$$

求得上述模型后, 令  $D_{\max_L} = D_{\min_L}$  还可以得到各视数下的相干性阈值:  $\gamma_1 \approx 0.40$ ,  $\gamma_5 \approx 0.32$ ,  $\gamma_{20} \approx 0.26$ . 这表示当相干性  $r < 0.4$  时, 未经多视处理的差分干涉图无法反映出任何地表形变信息; 当  $0.26 \leq r < 0.40$  时, 对原始干涉图做多视处理有可能检测到较小的形变量级; 当  $r < 0.26$  时, 即使采用 20 视, InSAR 技术也无法监测任何地表形变信息.

综上所述, 考虑了视数的形变梯度函数模型不仅扩展了已有模型的适用范围, 而且增加了观测结果的相干阈值. 新模型在初步判断地表形变是否可以用 InSAR 技术来量测的同时将进一步优化雷达数据选择和干涉处理配置. 与国内外现有研究相比, 该模型的使用更能反映 InSAR 地表监测的实际情况.

## 4 实例研究

用于验证的真实数据选取 Bam 地区轨道号分别为 9192 和 9693 两景 SAR 影像, 不同的 SAR 数据保证了模型验证的独立性. 该干涉对时间间隔为 35 天, 垂直基线约 500 m. 在差分干涉处理中, 采用 3 弧秒的 SRTM 数据进行地形相位去除. 经修正后的 goldstein 滤波<sup>[12]</sup>处理得到的差分相位如图 7 所示. 考虑到垂直基线过长引起的地形残余相位贡献, 我们选择地势较为平坦的 J 作为研究区, 其主要用于验证形变梯度与干涉视数之间的关系, 据此进一步比较推断了 Baran 提出的模型不适用于因视数改变引起的形变条纹率变化的情况.

图 8 为图 7 中的子区域 J, 该地区的相干均值为 0.401, 分别进行 1、5 和 20 视处理后可见条纹的清晰度发生了明显变化. 研究目标 CD 相距约 289.4 m, 形变量 56 mm (2 个条纹), 计算得形变梯度为

$0.1935 \times 10^{-3}$ . 从目视解译被放大的 CD 区域可知, 在 1 视处理后方框内的干涉图由于受强噪声影响, CD 方向的条纹轮廓和条纹数模糊不清. 20 视下 CD 两点之间因较低的空间分辨率发生了条纹混叠, 条纹信息丢失. 然而在 5 视处理的干涉图中, 条纹轮廓清晰, 条纹数较易辨认.

同时, 我们针对上述目视结果还给予了定量分析. 从空间域来看, 完整的周期相位值每间隔  $2\pi$  便会因幅角取主值跳跃一次, 若 CD 方向的条纹没有受到强噪声(单视)和采样率过低(20 视)的影响, 那么各个断点之间的相位应保持周期特征,  $-\pi$  到  $\pi$  之间的断点(breakpoint)在一维空间可以识别, 每个跳跃点表示一个干涉条纹. 据此, 我们提取沿 CD 剖线上的相位值至一维空间(图 9).

分析这些剖面图可以看出, 在 5 视下的断点(breakpoint)数为 2; 单视条件下由于噪声和干涉相位在空间域无法分离导致断点(条纹数)不确定; 当视数为 20 时, 较低的空间采样率引起了相位混叠, 相位仅在第六个像元出现了一次跳跃. 另外, 根据文献[18, 19]中的干涉条纹算法, 首先采用快速傅里叶变换(FFT)对图 8 中的复数据进行谱分析, 分别估计距离向和方位向的条纹率, 然后进行相位恢复. 可以求得当  $L=1, 5, 20$  时, 在 CD 为对角线的矩形区域内, 条纹个数分别为 0, 2, 1.

以上的目视判读和定量分析都充分说明该真实数据的形变梯度只能在 5 视条件才能准确探测. 基于此, 我们将上节建立的线性模型和真实数据 J ( $0.401, 0.1935 \times 10^{-3}$ )一并描绘在图 10 中, 观察模型的预测结果是否与上述分析相吻合.

可以看出, J 点落在 1、5 和 20 视上界相交的三角形区间内(黑色实点). 而三角区间的物理意义表示该范围的形变梯度只能在 5 视下才可以监测到. 模型估算与实际观测结果吻合不仅表明形变梯度的检测范围的确与视数有关, 而且更进一步说明了经验函数模型预测的正确性, 该观测结果也同时证明了 Baran 等提出的函数模型不能准确判断因视数改变引起的可检测形变梯度变化.

## 5 结论与展望

本文通过大量的模拟和真实数据研究了 InSAR 可检测的最大最小形变梯度与视数和相关性的关系, 并建立了视数为 1、5 和 20 时 InSAR 可检测的最大最小形变梯度的经验函数模型. 同时, 选

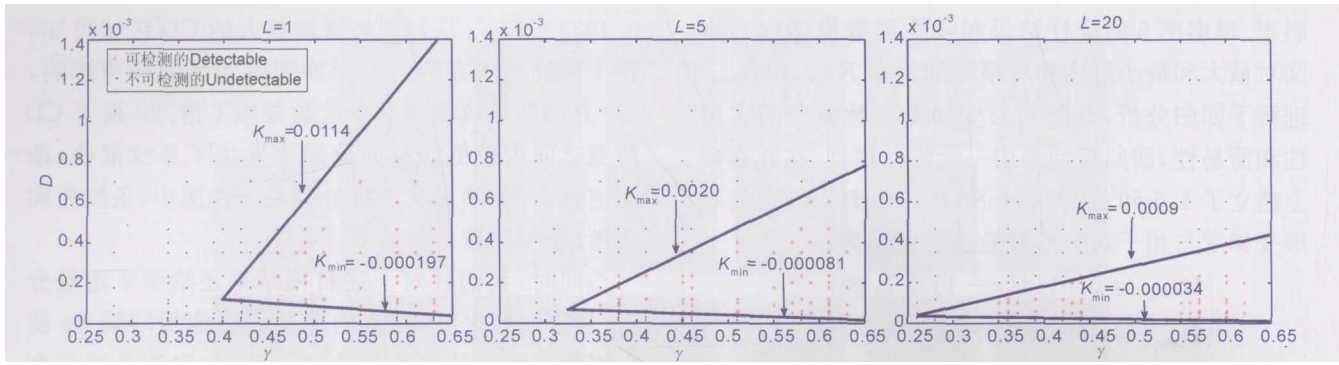


图 6 1、5 和 20 视下,模拟的形变梯度能否被 InSAR 检测到的统计结果  
 Fig. 6 Statistical results of whether the simulated deformation gradients can be retrieved by InSAR for multilook numbers of 1, 5 and 20

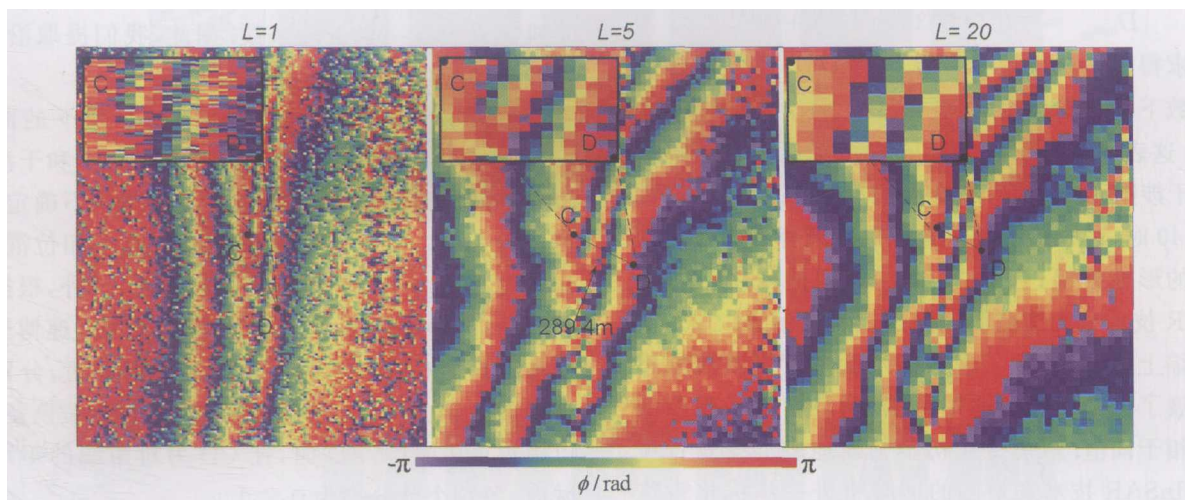


图 8 J 验证区的形变条纹及放大的 CD 区域  
 Fig. 8 Deformation fringes for the J test site and magnified CD area

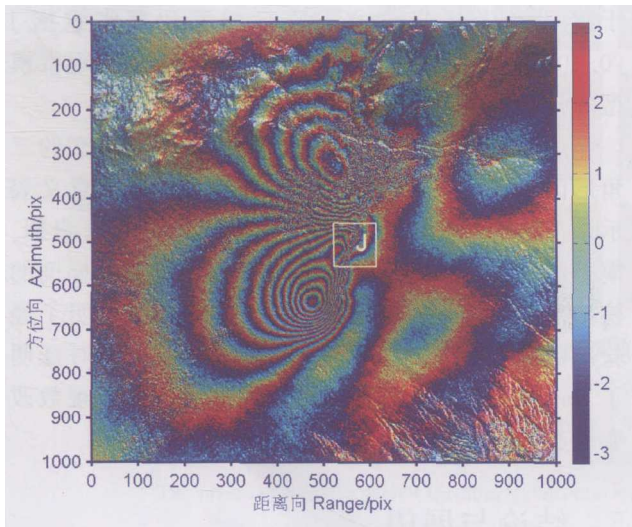


图 7 差分干涉图及验证区 J  
 Fig. 7 The differential interferogram and the selected validation sites J

取了伊朗 Bam 地区一对干涉图中的子区域,对建立的经验函数模型进行了验证,验证结果显示新建立

的模型能够很好预测地表形变能否被 InSAR 技术检测到. 与 Baran 建立的只考虑了相干性的模型相比,本文建立的同时考虑了视数和相干性的模型更完善、更准确,适用范围更广,可以作为初步判断雷达干涉测量技术能否成功检测到地表已经发生的变形的工具.

虽然本文采用了大量的模拟/真实数据建立 InSAR 可检测的最大最小形变梯度的经验函数模型,但建模过程中的缺陷也显而易见的. 首先,用目视的方法判读条纹的清晰程度及能否被 InSAR 技术成功检测到,带有较大的主观性,尤其是在相干性差、梯度大的区域. 其次,不同视数下相干性与形变梯度的线性关系是建立在经验性统计的基础之上,函数边界的可靠性依赖于样本数的多少,即观测值越多拟合精度越高. 尽管如此,我们还是可以通过该经验模型初步估计我们感兴趣的区域是否适合用差分干涉测量方法来监测. 采用其他手段(如大地测量、地质、物探等)得到研究区域的先验变形信息和



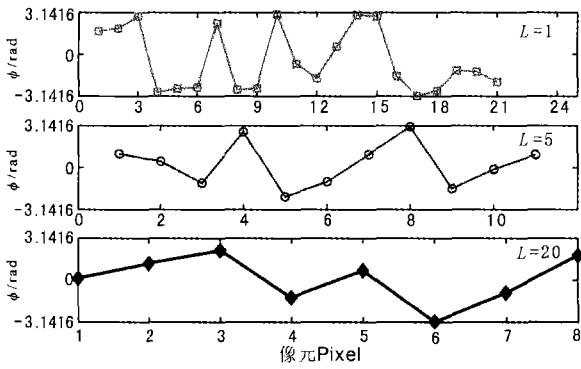


图 9 沿 CD 视线方向的相位值剖面图

Fig. 9 The interferometric phase profile along the look direction of CD

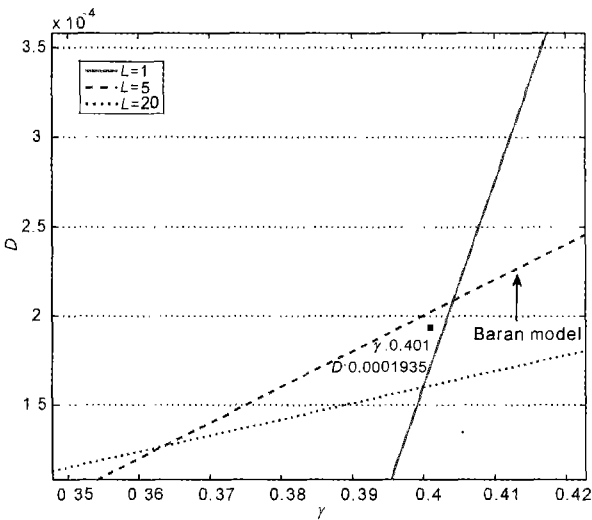


图 10 模型验证结果

Fig. 10 Results of model validation

估算形变梯度<sup>[8,15]</sup>,然后初步处理干涉图获取研究区域的相干性估计值<sup>[20,21]</sup>,或从相干性与地表属性的关系中初步判断相干值,最后将这两个参数放入图 10 的模型中便可初步估计干涉测量是否适于该地区的监测,在此基础上通过改变视数甚至还可以得到研究区域形变监测的最优干涉处理配置.随着硬件技术的不断提升,雷达卫星的不断增多,InSAR 可检测的最大最小形变梯度的范围会不断扩大<sup>[22,23]</sup>,采用本文的研究方法和经验函数模型,将能初步帮助科研人员选择雷达数据和干涉处理配置.

**致谢** 感谢欧洲航空局提供的 Envisat 卫星 ASAR 数据.感谢武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室田馨、蒋厚军等对本文提出的意见和给予的帮助.

参考文献(References)

[1] 刘国祥,丁晓利,李志林等. 使用 InSAR 建立 DEM 的试验研

究. 测绘学报,2001,30(4): 336~342

Liu G X, Ding X L, Li Z L, et al. Experimental investigation on DEM generation through InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* (in Chinese), 2001,30(4):336~342

[2] 廖明生,林 珺. 雷达干涉测量学:原理与信号处理基础. 北京:测绘出版社,2003

Liao M S, Lin H. *Synthetic Aperture Radar Interferometry—Principle and Signal Processing* (in Chinese). Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 2003

[3] 刘国祥,丁晓利,陈永奇等. 使用卫星雷达差分干涉技术测量香港赤腊角机场沉降场. 科学通报,2001, 46(14): 1224~1228

Liu G X, Ding X L, Chen Y Q, et al. Ground settlement of chek lap Kok Airport Hong Kong detected by satellite synthetic aperture radar interferometry. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2001, 46(14):1224~1228

[4] 王 超,张 红,刘 智等. 苏州地区地面沉降的星载合成孔径雷达差分干涉测量监测. 自然科学进展,2002, 12(6): 621~625

Wang C, Zhang H, Liu Z, et al. Monitoring Suzhou ground deformation with D-InSAR. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2002,12(6):621~625

[5] 单新建,马 瑾等. 利用星载 D-INSAR 技术获取的地表形变场提取玛尼地震震源断层参数. 中国科学(D 辑),2002, 32(10): 837~844

Shan J X, Ma J, et al. Extracting co-seismic deformation of the 1997 Mani earthquake with differential InSAR. *Science in China* (Series D), 2002, 32(10): 837~844

[6] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950~959

[7] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Review of Geophysics*, 1998,36(4):441~500

[8] Baran I S, Stewart M, Claessens S. A new functional model for determining minimum and maximum detectable deformation gradient resolved by satellite radar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 675~682

[9] Bamler R, Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 1998, 14(4): R1~R54

[10] Lee J S, Hoppel K W, Mango S A, et al. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1017~1028

[11] Lee J S, Papathanassiou K P, Ainsworth T L, et al. New technique for noise filtering of SAR interferometric phase images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1456~1465

[12] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved filtering parameter determination for the goldstein radar interferogram filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2001, 56(3): 223~231

- Sensing*, 2008, **63**(6): 621~634
- [13] Chen Curtis W. Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry [Ph. D. thesis]. San Francisco: Stanford University, 2006
- [14] Hanssen R H. Radar Interferometry—Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands; Kluwer Academic Publishers, 2001
- [15] Baran I. Advanced satellite radar interferometry for small-scale surface deformation detection [ Ph. D. thesis ]. Australia; Curtin University of Technology, 2004
- [16] Trouvé E, Caramma H, Maitre H. Fringe detection in noisy complex interferograms. *Applied Optic*, 1996, **35** ( 20 ): 3799~3806
- [17] Born M, Wolf E. Principles of Optics (Pergamon Press). 1980
- [18] Zebker H A, Chen K. Accurate estimation of correlation in InSAR observations. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2005, **2**(2):124~127
- [19] Gabriel V, Trouvé E, Petillot I, et al. High-resolution SAR interferometry; estimation of local frequencies in the context of alpine glaciers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(4):1079~1090
- [20] Ferretti A, Monti-guarnieri A, Prati C, et al. InSAR Principles; Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA Publications, 2007
- [21] Martinez J M, Beaudoin A, Wegmuller U, et al. Classification of land-cover and forest types using multistate ERS tandem data acquired over hilly terrain. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1998, **4**: 1809~1811
- [22] Wegmuller U, Spreckels V, Werner C, et al. Monitoring of mining induced surface deformation using L-band SAR interferometry. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 2005, **3**: 2165~2168
- [23] Wegmuller U, Werner C, Strozzi T, et al. Monitoring mining induced surface deformation. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2004, **3**: 1933~1935

(本文编辑 汪海英)