

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0074- 05

基于粗精度 DEM 的复杂地形 InSAR 基线估计方法*

韦海军¹, 朱炬波², 梁甸农¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基线精度对合成孔径雷达干涉测量极其重要, 在研究传统基线估计方法的基础上, 提出了一种基于粗精度 DEM 的基线估计方法。利用 SRTM 数字高程及初始轨道数据去除干涉相位中的地形条纹, 通过分析剩余条纹的空间频率估计精确基线, 具有不依赖于精确轨道数据、不受地形限制的优点。利用西藏玛尼山区 ERS1/2 数据进行了实测数据验证, 实验结果表明得到的基线精度优于传统方法。

关键词: 合成孔径雷达; 干涉测量; SRTM; DEM; 基线

中图分类号: TN958 文献标识码: A

An Accurate Baseline Estimate Method for Rugged Terrain Utilize Rough DEM

WEI Hai-jun¹, ZHU Ju-bo², LIANG Dian-nong¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Baseline estimation is important to generate accurate DEM with SAR interferometry. A novel method for baseline estimation was introduced after an initial review of classical methods. The SRTM DEM and coarse orbital parameter were first used to produce a topographic-free residual interferogram. Accurate orbital parameter was then achieved by spatial-frequency analysis of the residual interferogram. This method has the advantage of spatial and precise orbital free ability. Validation was carried out with ERS-1/2 tandem data over the Mani mountain area of Tibet. Some representative methods of baseline estimation were then compared with the method introduced and the results showed more accurate estimation.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); interferometry; SRTM; DEM; baseline

合成孔径雷达干涉测量是目前获取大场景高精度 DEM 最具潜力的技术手段之一。通过对同一区域的多次观测, InSAR 还可对地表升降、火山活动和冰层移动等进行大范围精确监测。基线是 InSAR 的重要参数, 为了获取高精度的 DEM, 需要精确估计 InSAR 基线。经典的基线估计方法有轨道法^[1]、配准偏移量法^[2,5]、控制点法^[3]和空间频率法^[4]。轨道法根据雷达平台轨道测量数据进行基线估计, 估计精度依赖于轨道数据的精度, 误差通常在米级; 配准偏移量法利用 SAR 图像对配准偏移量估计基线, 对基线平行分量估计较准, 但由于观测几何的缺陷, 垂直基线估计误差较大; 控制点法根据地面控制点之间的相对距离、相对高度和干涉相位值迭代计算卫星坐标, 该方法的估计精度依赖于控制点的精度、数目和分布; 空间频率法根据干涉相位数据的功率谱估计基线参数, 此类方法精度较高, 但受地形条件的限制, 在基线估计时应尽可能选择平坦区域。除上述经典方法外, Kohlhasse^[6]利用 SAR 多次通过数据求解基线, 取得了较高的估计精度, 但该方法需要多组同场景数据; Guarnieri^[7]通过建立高程多分形统计模型与干涉纹图频谱之间的非线性对应关系求解基线, 该算法适应性强, 无需多次通过, 不需要控制点, 但是该方法对参数估计要求较高。

1 空间频率法基线估计原理

SAR 干涉测量的一般几何表示如图 1 所示。

* 收稿日期: 2009- 10- 12

作者简介: 韦海军(1979—), 男, 博士生。

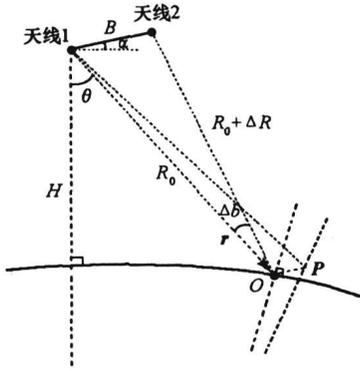


图1 InSAR 测量空间几何关系

Fig.1 Typical geometry of a cross-track InSAR

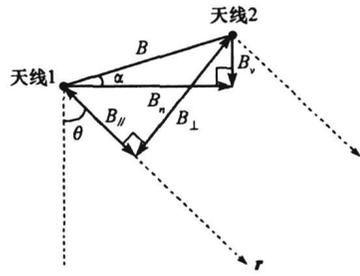


图2 基线 B 及其分解

Fig.2 Baseline and its components

天线 1 和 2 的飞行方向垂直于纸面向里,图中 H 、 θ 、 r 分别为天线 1 的高度、下视角和视线矢量, R_0 为天线 1 到地面点 O 的距离, $R_0 + \Delta R$ 为天线 2 到 O 的距离,基线 B 定义为两幅天线相对于地面点 O 的位置矢量之差。

由于实际测量中 $B \ll R_0$,对于地面点 O ,可以认为天线 1 和天线 2 的视线平行,如图 2 所示。可将基线分解为与视线方向平行的基线分量 $B_{||}$ 和与视线方向垂直的基线分量 B_{\perp} ,分别称之为平行基线和垂直基线。参照大地水平面又可将基线分解为水平基线 B_h 和竖直基线 B_v 。由于平行基线可以直接由 SAR 图像距离向配准偏移量中直接得到,下面着重讨论垂直基线 B_{\perp} 的估计。

为了研究地面任意两点之间的相位关系,建立如图 3 中的坐标系:首先是 SAR 图像坐标系,以快时间方向为 τ 轴,慢时间方向为 t 轴,假设天线沿 t 方向运行速度为 v_s ;然后是空间直角坐标系,以地面上任意点 O 为坐标原点, x 轴与 t 轴重合, y 为快时间方向 r 在地平面投影(即地距方向), z 垂直于地表方向且与 x 、 y 成右手系。考虑两点 $O(0,0,0)$ 与 $P(x,y,z)$,设 α_x 为方位向坡度角, α_y 为距离向坡度角。

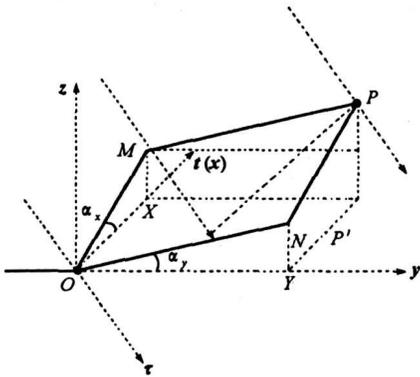


图3 地面任意两点 O 、 P 的空间关系

Fig.3 Arbitrary two points O , P on ground

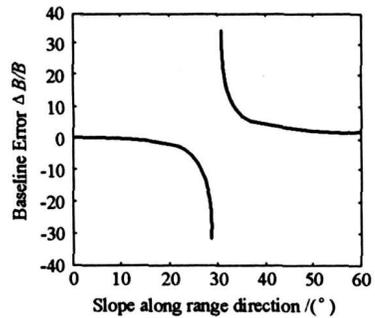


图4 存在坡度的基线估计误差

Fig.4 Relationship between baseline error and slope

由图 3 中的几何关系可以知道,点 $P(x,y,z)$ 在雷达坐标系下的坐标为

$$t = \frac{x}{v_s}, \quad \tau = y \frac{2 \sin \theta}{c} - z \frac{2 \cos \theta}{c} \quad (1)$$

其中 c 代表光速, θ 与图 1 中定义相同,且有

$$z = x \tan \alpha_x + y \tan \alpha_y \quad (2)$$

考虑 P 、 O 两点之间的干涉相位差 $\Delta \phi(t, \tau)$,有(详细推导过程参见文献[7]附录 A):

$$\Delta \phi(t, \tau) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{c \tau \Delta \theta}{2 \tan(\theta - \alpha_y)} + \frac{v_s t \tan \alpha_x \Delta \theta}{\sin(\theta - \alpha_y)} \cos \alpha_y \right] \quad (3)$$

式中, $\Delta \theta$ 为 P 、 O 点位置差异带来的下视角变化, λ 为雷达波长。根据远场假设,有如下近似:

$$\Delta\theta \approx \frac{B_{\perp}}{R_0} \quad (4)$$

由式(3)可以推导出干涉相位随距离向和方位向的空间频率^[7]:

$$\Delta f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Delta\phi(t, \tau)}{\partial \tau} = -\frac{4\pi c}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{2 \tan(\theta - \alpha_y) R_0} \quad (5)$$

$$\Delta f_s = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \phi(t, \tau)}{\partial t} = -\frac{2f_0 B_{\perp} v_s \tan \alpha \tan \alpha_y}{c R_0 \sin(\theta - \alpha_y)} \quad (6)$$

式(5)表明,距离向干涉相位空间频率与距离向坡度角有关;式(6)表明,方位向空间频率与方位向、距离向坡度角都有关系。

考虑距离向空间频率,当 α_y 为0时,式(5)为平地条纹频率:

$$\Delta f_{r-flat} = -\frac{4\pi c}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{2 \tan \theta R_0} \quad (7)$$

由式(7)可推导出垂直基线 B_{\perp} 的估计

$$B_{\perp} = -\frac{\Delta f_{r-flat} \tan \theta R_0 \lambda}{2\pi c} \quad (8)$$

但是当地面存在起伏时, $\Delta\phi(t, \tau)$ 包含了两类相位:由于平地效应带来的相位成分 $\Delta\phi_{flat}$ 和由于地面高度变化带来的相位 $\Delta\phi_{upo}$,从而 Δf_r 包含平地频率 Δf_{r-flat} 与地形频率 Δf_{r-upo} 。

$$\Delta f_r = \Delta f_{r-flat} + \Delta f_{r-upo} \quad (9)$$

而此时将 Δf_r 看作 Δf_{r-flat} ,用式(8)进行基线估计就存在较大误差,误差与真实值之比为:

$$\frac{\Delta B_{\perp}}{B_{\perp}} = 1 - \frac{B_{\perp}}{B_{\perp}} = 1 - \frac{\Delta f_r \tan(\theta) R_0 \lambda}{\Delta f_r \tan(\theta - \alpha_y) R_0 \lambda} = 1 - \frac{\tan \theta}{\tan(\theta - \alpha_y)} \quad (10)$$

图4为下视角 θ 为 30° ,真实基线为1km时,基线估计误差与距离向坡度角之间的关系。

另外,由于地形条纹的存在,使得 Δf_r 的频谱展宽,往往也不能得到 Δf_{r-flat} 较准确的估计。

2 利用粗精度 DEM 估计基线

地形条纹的存在使得基线估计的空间频率法精度较差,能否在基线估计时去除由于地形起伏所带来的干涉相位变化是该方法能否在复杂区域取得较高精度的关键。将式(5)与式(7)代入式(9),就得到了地形条纹频率:

$$\begin{aligned} \Delta f_{r-upo} &= \Delta f_r - \Delta f_{r-flat} = -\frac{4\pi c}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{2 \tan(\theta - \alpha_y) R_0} + \frac{4\pi c}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{2 \tan \theta R_0} \\ &= -\frac{4\pi c}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{2 R_0} \left[\frac{1}{\tan(\theta - \alpha_y)} - \frac{1}{\tan \theta} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

分析式(11),要得到地形条纹频率,需要知道垂直基线 B_{\perp} 和局部坡度角 α_y 。2000年进行的SRTM数字高程数据可以由互联网免费获取,该数据提供了全球北纬 60° 至南纬 57° 范围内所有陆地(约占全球陆地总面积的80%)的高度信息。尽管该数据网格大小为90m左右,但在后面的研究中,我们发现该数据对于本文中的应用已经足够。垂直基线 B_{\perp} 是未知量,可以通过构造迭代算法,代入初始基线估计值来达到逐步求精的目的。

具体算法流程如图5所示,首先将主图像与外部粗DEM作配准^[8],得到场景的粗精度DEM;主辅图像作配准,得到干涉相位。然后用经典基线估计方法得到初始基线的估计值,并以此为迭代初值,用场景粗DEM仿真带轨道误差的理想相位图^[9]。再在干涉相位图中减去理想相位图,就得到了由于基线初始估计误差带来的残余条纹。从残余条纹中用空间频率法估计残余基线,并将其与初始基线相加就得到了基线的新的估计值。最后,将新的基线估计值作为进一步迭代的初值,再代入上述流程中,可以得到基线更精确的估计。

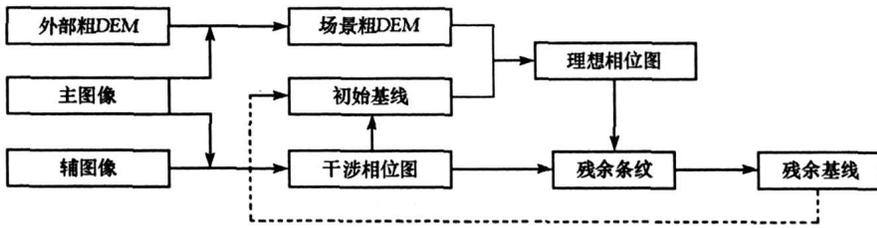


图 5 本文算法流程图
Fig.5 Steps of our method

3 实验结果与分析

试验数据为西藏玛尼山区 ERS 1/2 串行任务数据, ERS1 数据获取时间为 1996 年 4 月 15 日, 图像大小为 4900×26 541 像素; ERS2 数据获取时间为 1996 年 4 月 16 日, 图像大小为 4900×25 520 像素。主图像的幅度图如图 6 所示, 对应的 SRTM DEM 如图 7 所示, 干涉相位图(取值范围, 下同)如图 8 所示。其他系统参数如表 1 所示。

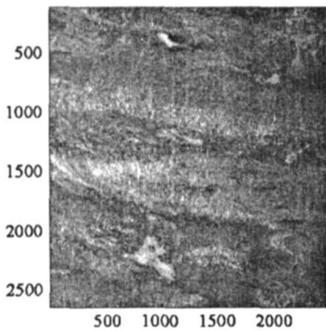


图 6 原始数据主图像幅度显示
Fig.6 Amplitude of master data

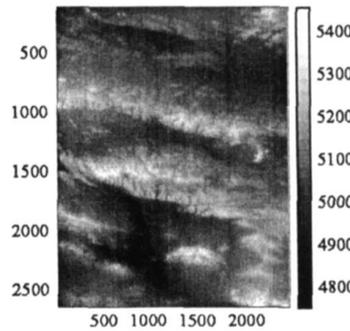


图 7 主图像对应 SRTM DEM
Fig.7 Corresponding SRTM DEM

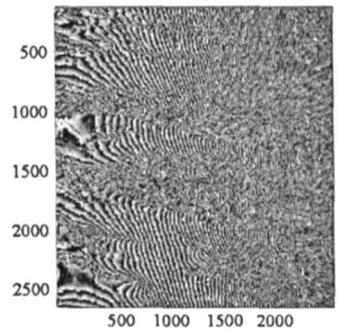


图 8 干涉条纹
Fig.8 Initial Interferogram

表 1 ERS 1/2 数据部分参数
Tab.1 ERS 1/2 data parameters

轨道地心距(km)	轨道倾角	波长(cm)	带宽(MHz)	极化	视角	分辨率(m)	场景中心
7159	98.5°	5.7	15.5	VV	20°	方位向 7.9 距离向 4	北纬 35.6° 东经 87.3°

采用传统方法得到的场景中心基线如表 2 所示, ESA 轨道为欧洲航空航天局提供的精确轨道数据, 作为轨道真值, 以供参考。

表 2 不同初始基线估计方法估计结果及欧洲航空航天局(ESA)提供的精确轨道数据
Tab.2 Baseline estimation by different methods and accurate baseline provide by ESA

基线估计方法	轨道法	配准偏移量法	空间频率法	ESA 轨道
平行基线(m)	- 45.1883	- 42.7872	- 41.9977	- 45.3132
垂直基线(m)	- 99.7175	- 95.5718	- 94.2815	- 99.4357

上述结果显示, 对于该组数据, 空间频率法与配准偏移量法误差都大于 1m, 轨道法的误差最小, 垂直基线误差为 0.12m, 平行基线误差为 0.28m。

由于初始基线值对本文方法影响较小, 采用配准偏移量法得到的基线作为初始基线, 代入算法流程。使用初始基线得到的残余条纹如图 9 所示。经过一次迭代后的残余条纹如图 10 所示, 第二次迭代后的残余条纹如图 11 所示。两次迭代基线估计值及参考精轨数据如表 3 所示。

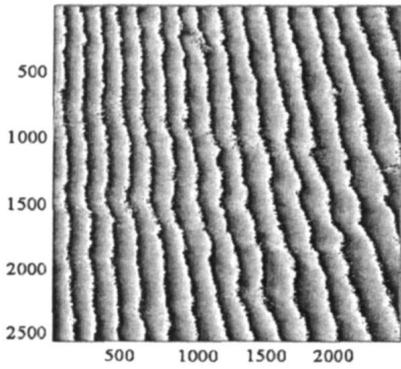


图9 干涉条纹去除初始理想条纹后的残余条纹
Fig. 9 Residual phase after ideal fringing removal

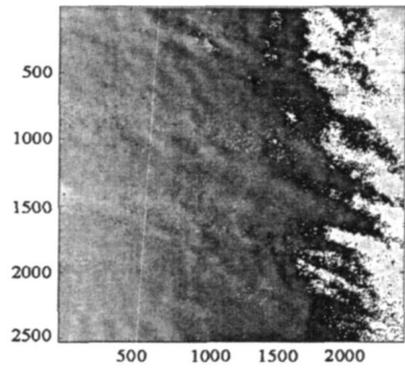


图10 经过一次迭代后的残余条纹
Fig. 10 Residual phase after first iteration

表3 两次迭代基线估计值及欧洲航空航天局(ESA)提供的精确轨道数据
Tab. 3 Estimated baseline after iterations and accurate baseline provide by ESA

基线估计	初始	第一次迭代	第二次迭代	ESA 轨道
平行基线(m)	- 42. 7872	- 44. 3373	- 45. 2581	- 45. 3132
垂直基线(m)	- 95. 5718	- 100. 0990	- 99. 4816	- 99. 4357

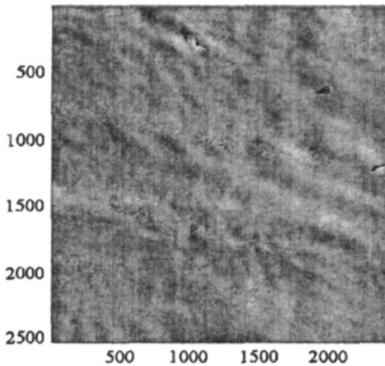


图11 经过两次迭代后的残余条纹
Fig. 11 Residual phase after second iteration

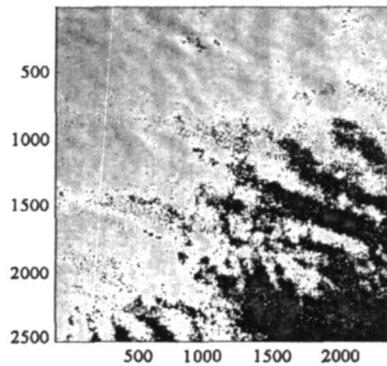


图12 由精轨数据得到的残余条纹
Fig. 12 Residual phase with accurate orbital data

通常情形下, 本文方法只需要两次迭代就能够得到精度较高的结果, 如果假定 ESA 的精密轨道数据为轨道真值, 两次迭代后本文方法垂直基线误差为 0. 0459m, 平行基线误差 0. 0551m, 远优于传统方法。另外, 采用本文残余相位图分析方法, 可以看到由 ESA 精轨数据得到的残余相位(图 12)存在相位缓变, 而本文方法得到的残余相位分布均匀, 因此, 精度应该更高, 但是 ESA 精轨数据是目前精度最高的轨道数据, 因此无法进行进一步的定量分析。

本方法也存在一些不足之处, 当地形较 SRTM DEM 发生大范围较大变化时(如发生强地震灾害等), 本文方法精度就会受到影响。另外本文方法不能去除两次通过大气传播差异所带来的估计误差, 这需要通过结合多次通过数据联合滤波的方法^[6]给予解决。

(下转第 89 页)

因素。通过仿真,定性和定量地分析了天线在空域方位电扫和俯仰电扫时的主极化和交叉极化方向图,分析结果表明,在空间扫描的不同位置,相控阵天线的极化特性呈一定规律变化。

从各个不同的角度对相控阵天线的极化特性进行了分析,并给出了相应的分析结果。本文只是分析了均匀分布偶极子阵列天线的空域极化特性,而在实际应用中,阵元型式种类繁多,口径电场的幅度和相位加权,馈电方式、共形阵的各单元具有不同的指向的因素必然会给极化特性的分析带来新的问题和影响,还需要做更进一步的研究,但本文的分析结果具有一般性,作为对相控阵天线空域极化特性研究的初探,具有一定的理论和实际意义,对于在外场试验评估雷达威力和精度中减少天线极化特性的影响,修正相控阵雷达天线的仿真模型,丰富内场仿真理论,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Boemer W M. Recent Advances in Extra-wide-band Polarimetry, Interferometry and Polarimetric Interferometry in Synthetic Aperture Remote Sensing and Its Applications [J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2003, 150 (3): 113- 124.
- [2] Wang X S, Chang Y L, Dai D H, et al. Band Characteristics of SINR Polarization Filter [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(4): 1148- 1154.
- [3] Howard S D, Caherbank A R. A Simple Signal Processing Architecture for Instantaneous Radar Polarimetry [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2007, 53(4): 1282- 1289.
- [4] 罗佳,王雪松,李永祯,等. 天线空域极化特性的表征及分析[J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 620- 628.
- [5] 罗佳,王雪松,李永祯,等. 一种估计来波信号极化状态的新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 56- 61.
- [6] Luo J, Wang X S, Xiao S P. Spacial Polarization Characteristics of Antenna [C]// 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings (APSAR- 2007), Huangshan, China, 2007: 139- 144.
- [7] Bray M G, Werner D H. Optimization of Thinned Aperiodic Linear Phased Arrays Using Genetic Algorithms to Reduce Grating Lobes during Scanning [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(12): 1732- 1742.
- [8] 王楠,薛正辉,杨仕明,等. 宽带超低副瓣相控阵天线时域远场辐射特性研究[J], 电子学报, 2006, 34(9): 1605- 1609.
- [9] 杜小辉,李建新,郑学誉. X波段双极化有源相控阵天线的设计[J], 现代雷达, 2002, 5(9): 67- 69.
- [10] Qi Z S, Guo Y, Wang B H. Performance Analysis of MUSIC for Conformal Array [C]// 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOM07), Shanghai, 2007: 168- 171.
- [11] 齐子森,郭英,王布宏,等. 共型阵列天线 MUSIC 算法性能分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2674- 2677.

(上接第 78 页)

参考文献:

- [1] Small D, Wemer C, Nuesch D. Baseline Modelling for ERS- 1 SAR Interferometry [C]// IEEE IGARSS' 93, 1993: 1204- 1206.
- [2] Zebker H A. Interferometric SAR Processing Tutorial [EB]. <http://ee.stanford.edu/~zebker>, 1996: 208- 216.
- [3] Hiroshi K, Masahiro T. Baseline Estimation Using Ground Points for Interferometric SAR [C]// IEEE IGARSS' 97, 1997: 242- 244.
- [4] Singh K, Stussi N, Keong K L, et al. Baseline Estimation in Interferometric SAR [C]// IEEE IGARSS' 97, 1997: 454- 456.
- [5] Kneřdik S, Loffel O, Hein A, et al. A Novel Approach to Accurate Baseline Estimation [C]// IEEE IGARSS' 99, 1999: 254- 256.
- [6] Kohlase A O, Feigl K L, Massonnet D. Applying Differential InSAR to Orbital Dynamics: A New Approach for Estimating ERS Trajectories [J]. Journal of Geodesy, 2003, 77: 493- 502.
- [7] Guarnieri A M. SAR Interferometry and Statistical Topography [J]. IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing, 2002, 40(12): 2567- 2581.
- [8] Zhou C X, Ge L L, E D C, et al. A Case Study of Using External DEM in InSAR DEM Generation [J]. Geospatial Information, 2005, 8(1): 14- 18.
- [9] Eineder M. Efficient Simulation of SAR Interferograms of Large Areas and of Rugged Terrain [J]. IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1415- 1427.