

文章编号: 1007-4619(2006)06-0864-05

固定带宽滤波对 InSAR 图像对 相关性影响的定量分析

郭春生¹, 朱兆达²

(1. 杭州电子科技大学 通信学院, 浙江 杭州 310018; 2. 南京航空航天大学 信息学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 讨论了干涉合成孔径雷达 (InSAR) 成像处理中基线解相关系数的频率函数, 分析了在距离向压缩过程中频谱窗函数对 InSAR 图像对相关性的影响, 通过定义干涉图距离向幅度谱函数的等效带宽来描述地形起伏, 推导出了等效带宽和 InSAR 图像对相关性之间的关系式。据此给出了在不同等效带宽情况下 (相当于不同地形起伏条件下), 固定带宽滤波对 InSAR 图像对相关性的影响。最后的实验结果验证了上述分析的正确性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 滤波; 相关性

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

Quantitative Analysis on the Effect of Fixed Bandwidth Filtering upon the Coherence of InSAR Images

GUO Chun-sheng¹, ZHU Zhao-da²

(1. College of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Zhejiang Hangzhou 310018, China;

2. College of Information Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China)

Abstract This paper discusses the spectrum function of InSAR baseline decorrelation coefficient and analyzes the effect of weighting function to InSAR baseline decorrelation coefficient in the procedure of range compression. And the equivalent bandwidth of interferogram spectrum in range direction is defined. Based on the estimated value of the equivalent bandwidth of interferogram spectrum in range direction, the relation between the equivalent bandwidth of interferogram spectrum in range direction and InSAR baseline decorrelation coefficient can be deduced. So the effect of fixed bandwidth filtering upon the coherence of the InSAR images could be quantitatively analyzed. At last of this paper, the experimental results using X-SAR data illustrate the validity of the analysis.

Key words interferometric synthetic aperture radar; filter; coherence

1 引 言

在干涉合成孔径雷达成像 (InSAR) 中^[1], 基线解相关是导致 InSAR 图像对相关性降低的主要原因之一^[2,3]。解决该问题可以采用多种滤波算法: 固定带宽滤波^[4]、空变维纳滤波^[5]、自适应移频滤

波^[6]和重采样滤波^[7]等, 其中固定带宽滤波以运算量小处理简单的特点得到广泛应用。

在实际应用中, 并非所有的 InSAR 图像对在固定带宽滤波后, 其相关性都能得到相应地提高, 某些 InSAR 图像对在滤波后相关性将下降。如何事先确定固定带宽滤波的效果以及如何选择固定带宽滤波的频谱窗函数, 对改善 InSAR 成像质量具有重要意

收稿日期: 2005-08-02; 修订日期: 2006-02-13

基金项目: 浙江省教育厅基金项目 (编号: 20030657)。

作者简介: 郭春生 (1971—), 男, 副教授, 2002 年获南京航空航天大学博士学位。主要从事合成孔径雷达成像信号处理方面的研究, 发表论文多篇。

义。因此本文分析了基线解相关系数的频率函数,提出使用干涉图距离向等效带宽来描述成像区域的地形起伏变化,据此定量分析了固定带宽滤波对 InSAR 图像对相关性的影响,讨论了在固定带宽滤波中不同频谱窗函数对滤波效果的差异。最后使用 X-SAR 数据验证了上述分析的正确性。

2 基线解相关系数的频率函数

InSAR 图像对配准后,图像距离向的一维信号可表示为^[5]:

$$\begin{cases} g_1(\tau') = s_1(\tau') + n_1(\tau') \\ \quad = \int z(\tau) e^{-j\psi(\tau)/2} h(\tau' - \tau) d\tau + n_1(\tau') \\ g_2(\tau') = s_2(\tau') + n_2(\tau') \\ \quad = \int z(\tau) e^{j\psi(\tau)/2} h(\tau' - \tau) d\tau + n_2(\tau') \end{cases} \quad (1)$$

式中, τ' 为距离向时间变量, $z(\tau)$ 表示地表的反向散射系数, $h(\tau)$ 为 SAR 系统的距离向脉冲响应函数, n_1 和 n_2 为不可避免的互不相关的加性白噪声, $\psi(\tau)$ 为干涉相位值。在平坦地形情况下,无噪声干涉相位值与雷达到目标的距离成近似线形关系: $\psi(\tau) = 2\pi\Delta f\tau$, 这里 Δf 是 InSAR 图像对距离向的频谱偏移(以下简称 InSAR 信号对频差)^[8]。

将式(1)中的时域卷积改写为频域相乘的形式后,可以得到:

$$\begin{cases} g_1(\tau') = \int Z(f)H(f-\Delta f/2)\exp[j\pi(f-\Delta f/2)\tau']df + n_1(\tau') \\ g_2(\tau') = \int Z(f)H(f+\Delta f/2)\exp[j\pi(f+\Delta f/2)\tau']df + n_2(\tau') \end{cases} \quad (2)$$

式中, $Z(f)$ 是 $z(\tau)$ 的傅里叶变换, $H(f)$ 为 $h(\tau)$ 的傅里叶变换。

通常可以采用相关系数描述 InSAR 图像对的相关性:

$$\rho = \frac{|E[g_1(\tau')g_2^*(\tau')]|}{\left\{E|g_1(\tau')|^2E|g_2(\tau')|^2\right\}^{1/2}} \quad (3)$$

于是,根据式(2), InSAR 图像对的相关系数为:

$$\rho = \frac{\left|\int H(f+\Delta f/2)H^*(f-\Delta f/2)df\right|}{\left[\int |H(f)|^2df\int |H(f)|^2df\right]^{1/2} + \sigma_n^2} \quad (4)$$

式中: $\sigma_n^2 = E|n_1(\tau')|^2 = E|n_2(\tau')|^2$ 。考虑到 SAR 系统的距离向脉冲响应函数可由距离向频谱窗函数 $W(f)$ 所确定,故 InSAR 图像对的相关系数为:

$$\rho = \frac{\int W(f+\Delta f/2)W(f-\Delta f/2)df}{\left[\int W(f)^2df\int W(f)^2df\right]^{1/2} + \sigma_n^2} \quad (5)$$

根据文献[2],忽略时间解相关的影响, InSAR 图像对的相关系数等于基线解相关和噪声解相关之积,即 $\rho = \rho_{\text{spatial}} \times \rho_{\text{thermal}}$, 其中噪声解相关系数 ρ_{thermal} 为:

$$\rho_{\text{thermal}} = \frac{1}{1 + \text{SNR}^{-1}} = \frac{\int W^2(f)df}{\int W^2(f)df + \sigma_n^2} \quad (6)$$

于是,得到基线解相关系数 $\rho_{\text{spatial}}(\Delta f)$ 为:

$$\rho_{\text{spatial}}(\Delta f) = \frac{\int_{-B/2}^{B/2} W(f-\Delta f/2)W(f+\Delta f/2)df}{\int_{-B/2}^{B/2} W^2(f)df} \quad (7)$$

式中, B 为信号的带宽。该式从 InSAR 信号距离向频谱给出基线解相关系数的表达式,将其称之为基线解相关的频率函数。可以看出基线解相关系数 ρ_{spatial} 随着 InSAR 信号对频差 Δf 的增加而减小,而具体变化取决于距离向频谱窗函数 $W(f)$ 。图 1 给出了分别在矩形窗、汉宁窗和三角窗三种不同距离向频谱窗函数 $W(f)$ 条件下,基线解相关系数 ρ_{spatial} 与 InSAR 信号对频差 Δf 之间的关系曲线。当 $W(f)$ 为矩形窗时,式(7)退化为:

$$\rho_{\text{spatial}}(\Delta f) = \begin{cases} 1 - \frac{|\Delta f|}{B_w}, & \text{当 } |\Delta f| \leq B_w \\ 0, & \text{当 } |\Delta f| > B_w \end{cases} \quad (8)$$

这与文献[4]中给出的结论是一致的。以下分析

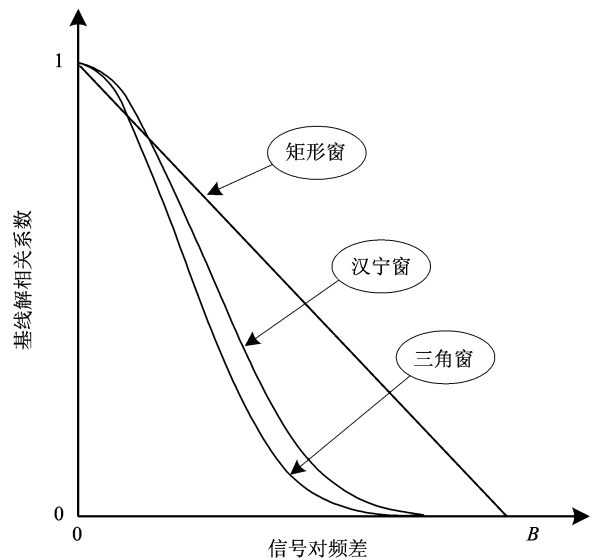


图 1 基线解相关系数和 InSAR 信号对频差之间的关系曲线
Fig 1 The relationship between baseline decorrelation coefficient and the frequency shift of InSAR images

InSAR 信号对频差 Δf 为了方便期间将 InSAR 信号对频差 Δf 标记为 f

3 干涉图的距离向等效带宽

在 InSAR 成像中, 成像区域的距离向地形起伏将影响图像对的相关性。文献 [2] 中给出 InSAR 信号对频差 f 为:

$$f = \frac{B_{\perp} c}{r_0 \lambda} \cot(\theta_1 - \beta) \quad (9)$$

式中, B_{\perp} 为等效基线长度, r_0 为 InSAR 天线到成像区中心点的斜距, c 为光速, λ 为雷达信号波长, θ_1 为微波信号的平均入射角, β 为地形坡度角。该式表明成像区域距离向的地形起伏与 InSAR 干涉图 (InSAR 图像对共轭相乘的结果) 距离向频谱的带宽直接相关, 距离向频谱的带宽越宽, 则表明成像区的距离向地形起伏变化越大, 反之亦然。

在干涉图的距离向幅度谱中包括信号分量和噪声分量, 假设信号分量的包络符合高斯函数:

$$G(f) = k \frac{1}{\sqrt{2\pi} a} \exp\left(-\frac{f^2}{2a^2}\right) \quad (10)$$

式中, k 为常数, a 被称之为干涉图的距离向等效带宽。当成像区地形平坦时, 干涉图的距离向频谱为 (9) 式所描述的单频信号; 当成像区地形存在起伏时, 干涉图的距离向信号幅度谱则具有一定的带宽。使用高斯函数描述信号幅度谱, 高斯函数中的参数 a 就描述了成像区地形变化情况。当 a 的取值较小时, 表示成像区的地形较平坦; 当 a 的取值大时, 表示成像区的地形起伏剧烈。

于是已知干涉图距离向的幅度谱为 $F(f)$, 估计干涉图的距离向等效带宽就可以使用高斯函数 $G(f)$ 去拟合函数 $M(f) \cdot F(f)$, 其中 $M(f)$ 为加权函数:

$$M(f) = \begin{cases} 1, & F(f) > C \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中, 常数 $C = 0.5 \times [\max(F(f)) - \min(F(f))] + \min(F(f))$ 。

这意味着保持函数 $F(f)$ 中较大的值 (主要取决于信号分量), 并将函数 $F(f)$ 中较小的值 (主要取决于噪声分量) 置为零。由于函数 $G(f)$ 是非线性的, 直接拟合函数 $M(f) \cdot F(f)$ 并不方便, 可对函数作对数变换, 将非线性问题转换为线性问题, 并得到以下的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 1 & f_1^2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & f_n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_0 \\ \vdots \\ k_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln[M(f_1) \cdot F(f_1)] \\ \vdots \\ \ln[M(f_n) \cdot F(f_n)] \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, $k_0 = \ln\left[k \frac{1}{\sqrt{2\pi} a}\right]$, $k_1 = -\frac{1}{2a^2}$ 。因此, 求解方程组的最小二乘解, 就可以得到干涉图距离向信号幅度谱等效带宽的估计值:

$$a^2 = -\frac{1}{2k_1} \quad (13)$$

将干涉图距离向等效带宽 a^2 作为成像区域距离向地形起伏的定量参数, 就可以与 InSAR 图像对基线解相关系数的频率函数一起, 分析固定带宽滤波对 InSAR 图像对相关性的影响。

4 固定带宽滤波对 InSAR 图像相关性影响的分析

根据 (7) 式, 基线解相关系数频率函数, 可以看作是带宽为 B 的频谱窗函数的归一化自相关函数, 那么将带宽是 $B - f'$ 的频谱窗函数的归一化自相关函数进行频率 f' 的频移后, 就得到 InSAR 图像对在频差为 f' 固定带宽滤波后的基线解相关系数频率函数。例如使用汉明窗作为频谱窗函数, 分别给出了在不同频差条件下基线解相关系数的频率曲线如图 2 所示。在固定带宽滤波前, 频差为 0 的信号分量其基线解相关系数为 1, 且随着信号频差量的增加, 基线解相关系数将单调减少。在频差为 f' 的固定带宽滤波后, 频差为 f' 的信号分量, 其基线解相关系数为 1, 且随着信号频差量与频差 f' 之差的增加, 基

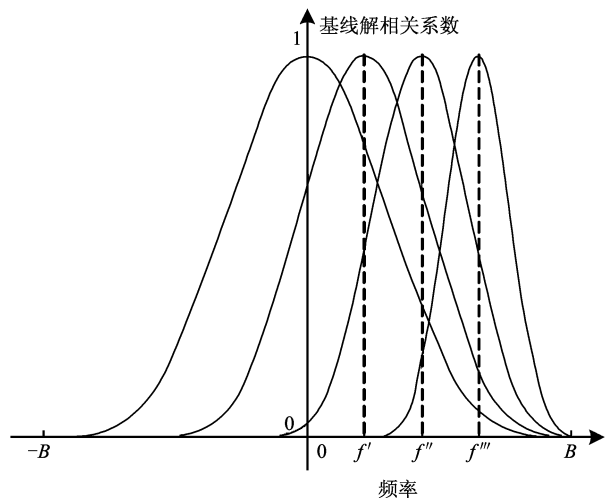


图 2 基线解相关系数的频率曲线

Fig 2 The frequency curves of baseline decorrelation coefficient

线解相关系数将单调减少。

根据干涉图距离向幅度谱的高斯函数 $G(f)$ 和固定带宽滤波前后的 InSAR 图像对基线解相关系数的频率函数 $\rho_{before}(f)$ 和 $\rho_{after}(f)$, 可以计算出固定带宽滤波前后 InSAR 图像对的平均基线解相关系数 ρ_{before} 和 ρ_{after} :

$$\rho_{before} = \frac{\int \rho_{before}(f)G(f)df}{\int G(f)df}, \quad \rho_{after} = \frac{\int \rho_{after}(f)G(f)df}{\int G(f)df} \quad (14)$$

这样, 比较固定带宽滤波前后 InSAR 图像对的平均基线解相关系数的大小, 就可以确定距离向等效带宽在固定带宽滤波中对 InSAR 信号对相关性的影响。当 $\rho_{after} > \rho_{before}$ 时, 固定带宽滤波后 InSAR 图像对的平均基线解相关性得到改善; 而当 $\rho_{after} < \rho_{before}$ 时, 固定带宽滤波后将造成 InSAR 图像对的平均基线解相关性得到降低。

基于上述分析, 在不同频谱窗函数条件下, 令 InSAR 图像对在固定带宽滤波前后的平均基线解相关系数相等, 就可以得到一系列关于 InSAR 信号对频差和等效带宽的关系曲线, 如图 3 所示。各条曲线从上到下频率加窗依次为布拉克曼窗, 汉宁窗, 海明窗, 三角窗和矩形窗。图中坐标值都对 InSAR 信号距离向带宽 B 作了归一化处理, 并将曲线上点的横坐标数值称作 InSAR 图像对在纵坐标对应的 InSAR 信号对频差下的临界等效带宽。不同曲线下面的区域, 意味着具有相应特性的 InSAR 图像对, 在固定带宽滤波后其平均基线解相关系数得到提高; 曲

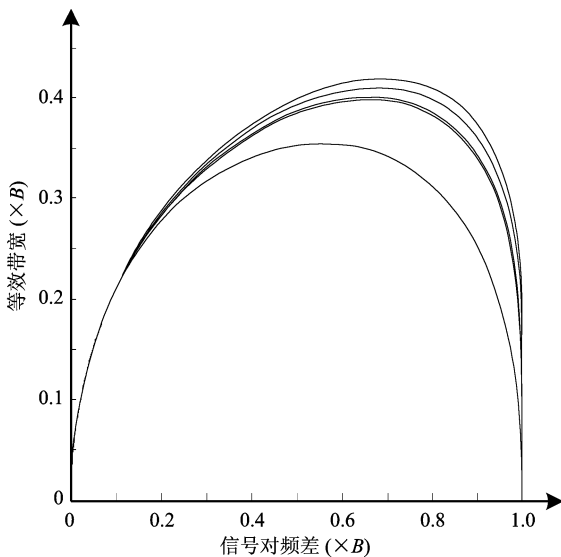


图 3 信号对频移和等效带宽的曲线图

Fig 3 The curves of frequency difference and the equivalent bandwidth

线上方的区域意味着具有相应特性的 InSAR 图像对, 在固定带宽滤波后其平均基线解相关系数将下降。同时也可以看出, 当信号对频移小于 $0.2B$ 时, 不同频谱窗函数对基线解相关性的影响基本相同; 但当信号对频移大于 $0.2B$ 时, 不同频谱窗函数对基线解相关性的影响是不同的, 其中布拉克曼窗的固定带宽滤波对地形起伏的适应性最佳。

5 实验结果

从 X-SAR 数据中选取 4 块反映不同地形起伏的 InSAR 图像对, 图像对的干涉相位图如图 4 所示, 其中图 4(a)和图 4(b)对应的成像区属于较平坦地形, 而图 4(c)和图 4(d)的成像区是具有一定起伏的地形。表 1 给出了不同 InSAR 图像对的相关参数 (包括等效带宽和临界等效带宽), 以及分别在矩形、三角和汉宁等 InSAR 图像对距离向频谱加窗情况下, 固定带宽滤波前后相关系数的实测值。

表 1 固定带宽滤波对 InSAR 图像相关性的影响
Table 1 The effect of fixed bandwidth filtering to the InSAR images

		数据 (a)	数据 (b)	数据 (c)	数据 (d)
数据参数	等效带宽 a	0.0776	0.1008	0.2373	0.3133
	临界等效带宽 a_c	0.1570	0.1360	0.1760	0.2040
矩形窗	滤波前实测 ρ_b	0.5139	0.5760	0.5884	0.5401
	滤波后实测 ρ_a	0.5614	0.6211	0.5808	0.5001
三角窗	滤波前实测 ρ_b	0.5582	0.6279	0.6359	0.5938
	滤波后实测 ρ_a	0.5714	0.6571	0.6084	0.4971
汉宁窗	滤波前实测 ρ_b	0.5573	0.6319	0.6411	0.6009
	滤波后实测 ρ_a	0.5678	0.6592	0.5990	0.4795

从表中可以看出, 成像区域平坦时 InSAR 干涉图的等效带宽较小, 随着 InSAR 干涉图等效带宽的增加, 对应成像区的地形起伏变化同样也加剧。比较等效带宽和临界带宽可以看出, 当 InSAR 图像对的干涉图等效带宽大于临界等效带宽时, InSAR 图像对经固定带宽滤波后, 图像对的相关性得到提高; 反之, InSAR 图像对在固定带宽滤波后, InSAR 图像对的相关性不增反降。

为了更清楚观察表 1 中数据的变化规律, 将临界带宽减去等效带宽后得到的差值作为横坐标, 不同频率加窗情况下滤波后前的平均相关系数的差值作为纵坐标, 画出一组等效带宽的变化与 InSAR 图像对相关性变化的关系曲线, 如图 5 所示。曲线基

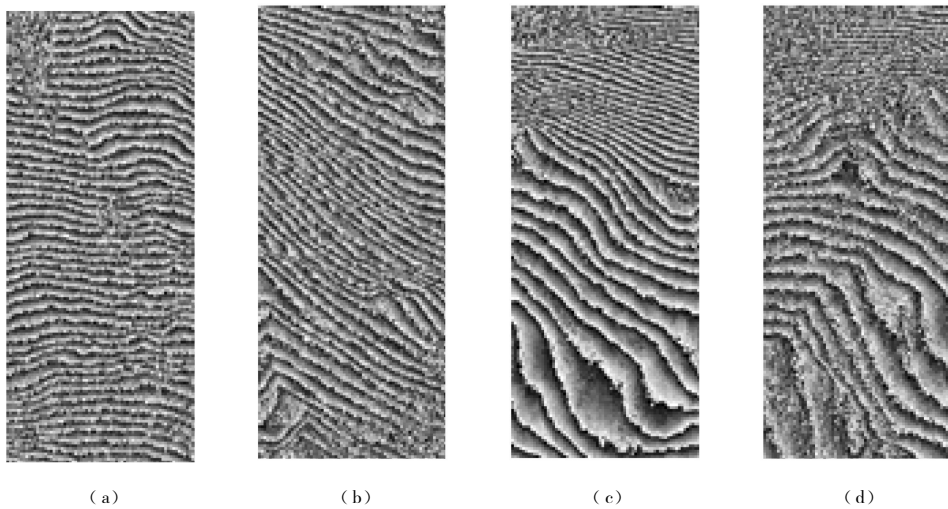


图 4 反映不同地形特点的干涉相位图

Fig 4 Two interferometric phase images reflecting different terrain

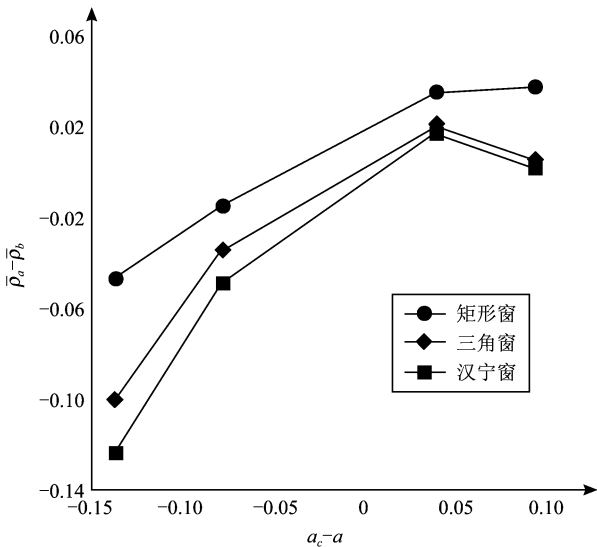


图 5 等效带宽的变化与 InSAR 图像对相关性变化的曲线

Fig 5 The curves of the change of InSAR coherence with the change of equivalent bandwidth

本符合递增的变换规律,从而验证了本文中理论分析的合理性。个别异常数据点存在的主要原因是 InSAR 图像对相关性不仅仅取决于基线解相关系数,还与噪声解相关系数和时间解相关系数有关。当然,如果干涉图距离向幅度谱中信号分量不符合高斯函数形状,也会造成变化规律不符合上述原则。

6 结 论

本文定量分析了固定带宽滤波对 InSAR 图像对相关性的影响,分析了不同频谱窗函数对固定带

宽滤波的影响,提出了使用 InSAR 信号对频差和干涉图距离向等效带宽来估计固定带宽滤波对 InSAR 图像对相关性的影响,并使用真实数据验证了分析方法的有效性。本文所述方法不仅可以选固定带宽滤波中频谱窗函数,也可以用在 InSAR 算法中事先确定基线解相关滤波的算法。

参 考 文 献 (References)

- [1] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic Aperture Radar Interferometry [J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88 (3): 333-382.
- [2] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30 (5): 950-959.
- [3] Moreira J, Schwabisch M, Fomaro G, et al. X-SAR Interferometry: First Results [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33 (4): 950-956.
- [4] Gatelli F, Guarnieri A M, Parizzi F, et al. The Wavenumber Shift in SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32 (4): 855-865.
- [5] Fomaro G, Guarnieri A M. Minimum Mean Square Error Space-varying Filtering of Interferometric SAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40 (1): 11-21.
- [6] Davidson G W, Bamler R. Multiresolution Phase Unwrapping for SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37 (1): 163-174.
- [7] Reigber A. Range Dependent Spectral Filtering to Minimize the Baseline Decorrelation in Airborne SAR Interferometry [A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceeding Piscataway: IEEE Publications [C]. 1999.
- [8] Lee H, Liu J G. Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry Using Ratio Coherence Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39 (2): 223-232.