

一种局部自适应的干涉相位图滤波方法

黄柏圣¹ 许家栋¹

(1 西北工业大学电子信息学院,西安市友谊西路 127 号,710072)

摘 要:提出了一种基于局部频率估计的自适应干涉相位图滤波方法。首先,利用相似最大似然法对干涉相位图进行局部频率估计,根据局部频率估计值,求取滤波窗口大小和旋转角度,通过内插求取滤波窗口内的像素值,使窗口内的像素更协调一致;然后,利用 Lee 滤波算法对窗口内的像素进行处理。仿真与实测数据处理结果表明,该方法不仅能有效抑制干涉相位噪声,而且能很好地保持干涉条纹的细节信息。

关键词:干涉相位图滤波;局部条纹频率估计;相似最大似然

中图法分类号:P237.3

近年来,InSAR 技术日益成熟,并广泛应用于遥感、测绘和地震监测等领域。在干涉数据处理中,两幅雷达图像经过滤波、配准和去平地相位后得到干涉相位图,再通过相位滤波和相位解缠等处理,最终获得场景的数字高程模型(DEM)和地表形变数据^[1]。对于干涉相位图滤波,降低相位噪声的影响是保证干涉测量精度的重要措施。为了获得更好的滤波效果,研究人员不断提出新的干涉相位图滤波方法^[2-4]。

本文提出了一种基于局部频率估计的自适应干涉相位图滤波方法,该方法对 Lee 滤波器^[3]进行了改进。首先,介绍了一种新的局部频率估计方法,基于频率估计值,求取滤波窗口大小和旋转角度,并旋转滤波窗口;然后,通过内插求取滤波窗口内的像素值,使窗口内的像素更协调一致。实验结果表明,该方法不仅能够很好地保持干涉条纹的细节信息,而且能有效地减少干涉相位图中的残余点数目。

1 相位噪声特性

多视干涉相位的概率密度函数是相关系数 ρ 和视数 n 的函数^[5],即

$$p_{\varphi}(\varphi)=\frac{\Gamma(n+\frac{1}{2})(1-|\rho|^2)^n\beta}{2\sqrt{\pi}\Gamma(n)(1-\beta^2)^{n+1/2}}+\frac{(1-|\rho|^2)^n}{2\pi}.$$

$$F(n,1;\frac{1}{2};\beta^2),-\pi<(\varphi-\theta)\leqslant\pi\quad(1)$$

根据式(1),可以在实数域建立干涉相位噪声加性模型^[4]:

$$\varphi_z=\varphi_x+v\quad(2)$$

式中, φ_z 为观测相位; φ_x 为无噪声相位; v 为噪声。标准差 σ_v 是视数 n 和相关系数 ρ 的函数,三者的关系曲线如图 1 所示。

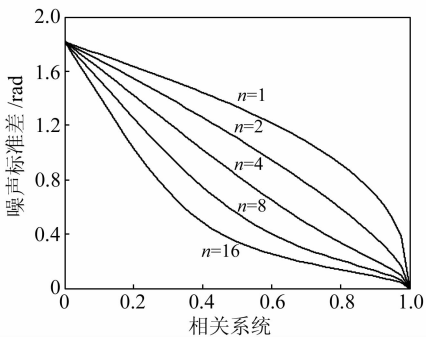


图 1 三个参数的关系曲线
Fig. 1 Relation of 3 Parameters

2 相似最大似然频率估计^[6]

在只有一个复正弦信号的情况下,一个小长方形窗口 $M\times N$ 复数信号模型可表示为:

$$x(m,n)=\gamma e^{j(\rho m+n)}+q(m,n)\\m=1,2,\cdots,M;n=1,2,\cdots,N\quad(3)$$

式中, γ 是未知复数幅度; $\mu \in (-\pi, \pi)$ 和 $\nu \in (-\pi, \pi)$ 为未知频率; $q(m, n)$ 是零均值复高斯白噪声。

最大似然频率估计是最常用的局部频率估计方法,但其计算量较大。为了避免计算量过大,本文给出了一种相似最大似然频率估计算法。

1) 根据式(4)计算初始值 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\nu}$:

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \angle \left(\sum_{n=1}^N \mathbf{y}_{n_1}^H \mathbf{W}_M(\tilde{a}) \mathbf{y}_{n_2} \right) \\ \hat{\nu} &= \angle \left(\sum_{n=1}^M \mathbf{z}_{m_1}^H \mathbf{W}_N(\tilde{b}) \mathbf{z}_{m_2} \right)\end{aligned}\quad (4)$$

式中, $\mathbf{y}_{n_1} = [x(1, n) \ x(2, n) \ \cdots \ x(M-1, n)]^T$; $\tilde{a} = -e^{-j\mu D}$; $\tilde{b} = -e^{-j\nu}$; $\mathbf{y}_{n_2} = [x(2, n) \ x(3, n) \ \cdots \ x(M, n)]^T$; $\mathbf{z}_{m_1} = [x(m, 1) \ x(m, 2) \ \cdots \ x(m, N-1)]^T$; $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\nu}$ 是 μ, ν 的估计值; $\mathbf{z}_{m_2} = [x(m, 2) \ x(m, 3) \ \cdots \ x(m, N)]^T$; $\angle(\cdot)$ 、T 和 H 分别表示求相角、转置和共轭转置; $\mathbf{W}_M(\tilde{a})$ 和 $\mathbf{W}_N(\tilde{b})$ 为对角矩阵,其对角线上的元素为:

$$[\mathbf{W}_M(\tilde{a})]_{m,m} = \frac{M}{4} \left\{ 1 - \left[\frac{m-1-(M/2-1)}{M/2} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

$$[\mathbf{W}_N(\tilde{b})]_{n,n} = \frac{N}{4} \left\{ 1 - \left[\frac{n-1-(N/2-1)}{N/2} \right]^2 \right\} \quad (6)$$

2) 利用 $\hat{\mu}, \hat{\nu}$ 和式(7)求 $\mathbf{W}_M(\hat{a})$ 、 $\mathbf{W}_N(\hat{b})$ 、 $\mathbf{P}_M(\hat{a})$ 和 $\mathbf{P}_N(\hat{b})$:

$$\begin{aligned}[\mathbf{W}_M(\hat{a})]_{m,n} &= \frac{M \min(m, n) - mn}{M} e^{j(n-m)\hat{\mu}} \\ [\mathbf{W}_N(\hat{b})]_{m,n} &= \frac{N \min(m, n) - mn}{N} e^{j(n-m)\hat{\nu}}\end{aligned}\quad (7)$$

$\mathbf{P}_M(\hat{a}) = \mathbf{A}_M^H(\hat{a}) \mathbf{W}_M(\hat{a}) \mathbf{A}_M(\hat{a})$, $\mathbf{P}_N(\hat{b}) = \mathbf{B}_N^H(\hat{b}) \cdot \mathbf{W}_N(\hat{b}) \mathbf{B}_N(\hat{b})$ 。 $\mathbf{A}_M(\hat{a}) \in \mathbf{C}^{(M-1) \times M}$ 和 $\mathbf{B}_N(\hat{b}) \in \mathbf{C}^{(N-1) \times N}$ 有如下形式:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_M(\hat{a}) &= \begin{bmatrix} 1 & \hat{a} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \hat{a} & & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \hat{a} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_N(\hat{b}) &= \begin{bmatrix} 1 & \hat{b} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \hat{b} & & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \hat{b} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

3) 利用式(8)和式(9)计算频率估计值:

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \angle \left(\sum_{n=1}^N \mathbf{y}_{n_1}^H \mathbf{W}_M(\hat{a}) \mathbf{y}_{n_2} - \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \mathbf{y}_{n_1}^H \mathbf{W}_M(\hat{a}) \mathbf{y}_{m_2} [\mathbf{P}_N(\hat{b})]_{n,m} \right)\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\hat{\nu} &= \angle \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{z}_{m_1}^H \mathbf{W}_N(\hat{b}) \mathbf{z}_{m_2} - \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^M \mathbf{z}_{n_1}^H \mathbf{W}_N(\hat{b}) \mathbf{z}_{m_2} [\mathbf{P}_M(\hat{a})]_{n,m} \right)\end{aligned}\quad (9)$$

4) 重复计算步骤 2) 和 3) 两次。

3 滤波窗口大小的选择

首先,在滤波中预设滤波器所能采用的最大窗口和最小窗口分别为 $\max W$ 和 $\min W$ 。 $\min W$ 一般取为 3。对干涉相位图进行均值滤波,当滤波后的干涉相位图出现较为明显的失真时,这时的滤波窗口大小即为所求的 $\max W$ 。令 $W_x(x, y)$ 和 $W_y(x, y)$ 分别为点 (x, y) 在 x 和 y 轴方向所应采用的滤波窗口大小。根据上述预设参数和相似最大似然法估计所得的干涉相位图局部条纹频率,可由式(10)得到 x 轴方向滤波窗口的大小:

$$W_x(x, y) = \text{int} \left[\left(1 - \frac{\hat{\mu}}{\max(\hat{\mu}, \hat{\nu})} \right) (\max W - \min W) \right] + \min W \quad (10)$$

式中, int 表示向最近的整数取整; $\hat{\mu}, \hat{\nu}$ 分别为像素点 (x, y) 行和列方向的局部频率估计值。如果 w_x 为偶数,则将 w_x 加 1 使之变为奇数。

同理,可获得各点在 y 轴方向滤波窗口的大小。

4 旋转变换与内插

基于局部频率估计,局部相位条纹法方向的计算公式为:

$$a_1 = \arctan(\hat{\nu}/\hat{\mu}) \quad (11)$$

为了使窗口内的像素近似在同一高度,方向窗放置在与局部相位条纹法方向垂直的位置上。

图 2(a)显示了一个 7×3 的母窗口;图 2(b)中, a_0 为母窗口的法方向, a 为倾斜窗口的法方向, $a_1 = a - a_0$, 当 $a_0 = 0$ 时, $a_1 = a$, 因此,将母窗口围绕中心像素旋转一个角度 a_1 就可得到倾斜窗口,坐标变换如下:

$$\begin{aligned}x_1 &= \cos(a_1)x - \sin(a_1)y \\ y_2 &= \sin(a_1)x + \cos(a_1)y\end{aligned}\quad (12)$$

式中, (x, y) 是旋转变换前的坐标; (x_1, y_1) 是旋转变换后的坐标。在旋转过程中,旋转窗口的尺寸将超过 7×7 , 因此,选择一个 9×9 的局部图像,并通过内插和归一化来确定倾斜窗口内的像素值(见图 2(c)和(d))。

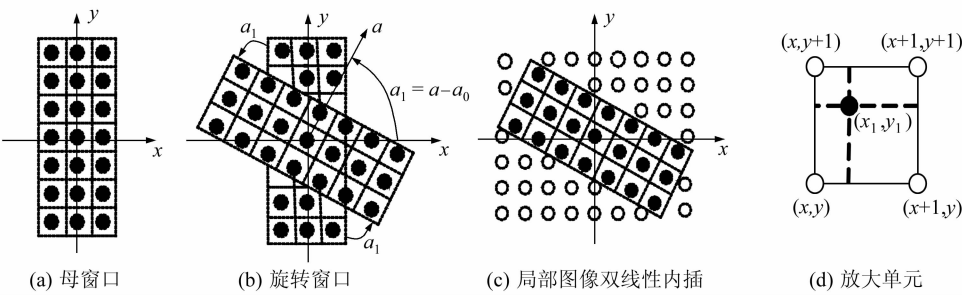


图 2 旋转变换与内插
Fig. 2 Rotation and Interpolation

5 在方向窗内滤波

本文对文献[7]中的算法进行了改进。由于滤波窗口的大小可以根据地形信息的分布进行自适应调整,从而使得滤波窗口内的像素更协调一致。

- 1) 对每个像素,在 9×9 的局部窗口内使用 AML 估计器进行频率估计。
- 2) 对每个像素,通过式(10)求取滤波窗口尺寸。
- 3) 通过式(11)计算局部相位条纹方向。
- 4) 根据式(12)计算方向窗内像素的坐标,在局部图像 $((\max(w_x, w_y) + 2) \times (\max(w_x, w_y) + 2))$ 内,通过内插,求取方向窗内像素值。
- 5) 计算方向窗内的像素的方差 $v(\varphi_x)$ 。
- 6) 根据方向窗中心像素的相干系数和图 1,查表求得 σ_v ,并通过式(13)计算 $v(\varphi_x)$:

$$v(\varphi_x) = v(\varphi_z) - \sigma_v^2 \tag{13}$$

- 7) 计算权重 $c = v(\varphi_x) / v(\varphi_z)$ 。
- 8) 在复数域通过下式进行滤波。

$$\hat{S}_x = \bar{S}_z + c(S_z - \bar{S}_z) \tag{14}$$

式中, $\hat{S}_x = e^{i\varphi_x}$; $S_z = e^{i\varphi_z}$; \bar{S}_z 是方向窗内 $\langle e^{i\varphi_z} \rangle$ 归一化值。

6 实验结果

6.1 对仿真数据的处理

为了比较各种滤波器的性能,根据式(2),在一个大小为 512×512 的仿真干涉相位图中加入相干系数为 0.65,对应 1 视标准差 1.152 6 rad 的均匀分布的加性相位噪声,如图 3 所示。

当相干系数为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 和 1 时,其对应 1 视标准差为 1.813 8、1.726 4、1.636 4、1.542 6、1.443 3、1.336 2、1.217 8、1.082 1、0.917 4、0.691 6 和 0。

在这 11 种情况下,计算得到的仿真无噪声干涉相位图和经过均值滤波 (5×3 、 3×5)、Lee 滤波、文献[7]算法和本文方法(窗口最大值和最小值分别预设 15 和 3)滤波后的干涉相位图之差的均方误差,如图 4 所示。根据图 4 可知,本文算法误差最小,因此,能够更好地保持干涉条纹结构。

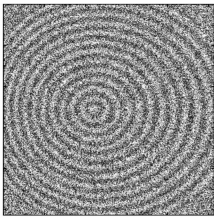


图 3 仿真噪声干涉相位图
Fig. 3 Interferogram of Simulating Noise

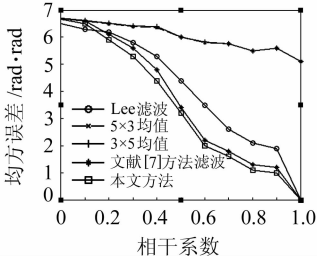


图 4 5 种滤波器的均方误差对比
Fig. 4 Comparison of Mean Square Error of 5 Filters

6.2 对 Etna 火山数据的处理

本文用意大利 Etna 火山数据进行了实验,进一步验证本文方法的降噪性能。干涉相位图的大小为 256×256 ,使用 5×3 均值滤波、Lee 滤波、文献[7]方法和本文方法对其进行滤波,结果如图 5 所示。

为了比较几种滤波器的降噪性能,分别计算滤波前以及几种方法滤波后干涉相位图中残余点的数量。滤波前残余点数 14 631,经过本文方法、文献[6]方法、 5×3 均值滤波、 3×5 均值滤波和 Lee 滤波后,残余点数降为 1 429、1 481、1 327、2 010 和 1 620,降低比分别为 90.23%、89.88%、90.93%、85.65% 和 88.93%。由此表明,本文方法比文献[7]方法具有更好的降噪性能。

表 1 为 4 种滤波方法在同一台计算机(P4 2.8 G,1 G 内存)上利用 Matlab 7.0 软件运行所需时间的对比(干涉图大小为 256×256)。本文方法在速度上比文献[7]方法要快,主要是因为本文方法比文献[7]算法复杂度要小。

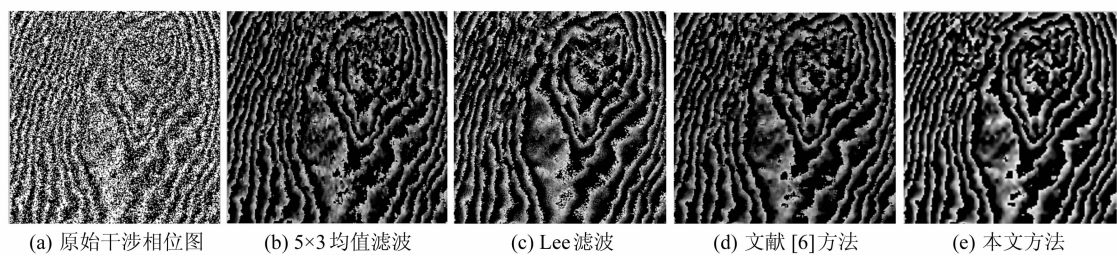


图 5 Etna 火山数据及 4 种方法滤波结果
Fig. 5 Filtering Results of 4 Methods

表 1 各滤波方法残点对比

Tab. 1 Comparison of Several Filtering Methods				
滤波方法	5×3 均值	Lee 滤波	文献[6]方法	本文方法
耗时/s	13	217	288	263

参 考 文 献

[1] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite Radar Interferometry: Two-Dimensional Phase Unwrapping[J]. Radio Science, 1998, 23: 713-720

[2] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25 (21): 4 035-4 038

[3] Lee J S, Papathanassiou K P, Ainsworth T L. A New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36 (5): 1 456-1 465

[4] Martiez C L, Fabregas X. Modeling and Reduction of SAR interferometric Phase Noise in the Wavelet Domain [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(12): 2 553-2 566

[5] Lee J S. Intensity and Phase Statistics of Multi-look Polarimetric and Interferometric Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994,32: 1 017-1 028

[6] So H S, Kit F. Approximate Maximum-Likelihood Algorithms for Two Dimensional Frequency Estimation of a Complex Sinus-Oid[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(8): 3 231-3 237

[7] Wu N, Feng D Z. A Locally Adaptive Filter of Interferanetric Phase Images[j]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006(1):73-77

第一作者简介:黄柏圣,博士生。主要研究领域为干涉 SAR 信号处理及 SAR 成像。
E-mail:huangbaisheng1@163.com

A Locally Adaptive Filter for Noise Filtering of InSAR Interferogram

HUANG Baisheng¹ XU Jiadong¹

(1 School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, 127 West Youyi Road, Xi'an 710072, China)

Abstract: An adaptive filtering approach for interferograms is proposed, which is a modification to the Lee adaptive complex filter. Firstly, the approximate maximum-likelihood (AML) method is introduced. Based on local frequency estimation, the sizes and rotation angle of the filtering window are calculated. The pixels in the filtering window are obtained by an interpolation to make the pixels in the filtering window have more approximately homogeneous values. Secondly, the results are obtained by Lee filtering method. Experimental results show that the proposed method can filter the phase noise effectively, and preserve the details of interferometric fringes better.

Key words: interferogram filtering; local fringe rates; approximate maximum-likelihood

About the first author: HUANG Baisheng, Ph. D candidate. His major research areas include signal processing of InSAR and SAR imaging.
E-mail: huangbaisheng1@163.com