

# 一种基于局部频率估计的地形自适应干涉图滤波器

朱岱寅, 朱兆达, 谢求成

(南京航空航天大学电子工程系, 江苏南京 210016)

**摘 要:** 本文提出一种用于 InSAR 处理的地形自适应干涉图滤波器. 该滤波器通过局部空间频率估计, 依据地形的变化进行参数调整, 能够有效地克服传统的多视滤波器破坏致密干涉条纹的缺点. 本文详细描述该地形自适应滤波器的结构, 并阐述其具体实现方法. 在局部频率估计中, 由于采用了二维 Chirp-Z 变换, 滤波器的计算效率较高. 用 X-SAR 的干涉数据对所提出的自适应滤波器进行了验证, 给出了自适应滤波器和传统多视滤波器的滤波结果, 说明前者具有保持干涉条纹的良好特性.

**关键词:** 干涉 SAR; 地形自适应滤波; Chirp-Z 变换; 相干性估计

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 12-1853-04

## A Topography Adaptive Interferogram Filter Based on Local Frequency Estimation

ZHU Dai-yin, ZHU Zhao-da, XIE Qiu-cheng

(Department of Electronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** In this paper, an efficient implementation of the topography adaptive filter based on local frequency estimation is proposed. This filter tunes its central frequency according to the local topography to preserve the tight fringes of the interferometric phase map as well as reduce the phase noise. We describe the structure and the implementation of this topography adaptive filter in detail. The 2D chirp-Z transform is applied to improve the efficiency and accuracy of the frequency estimation. X-SAR data of Mt. Etna is employed to show the effectiveness of this filter in comparison with the traditional multilook filter in term of fringe preservation.

**Key words:** interferometric SAR; topography adaptive filtering; Chirp-Z transform coherence estimation

### 1 引言

InSAR 是有力遥感工具, 能够用来探测地形. 但是, 由于热噪声、时间以及空间解相关噪声的影响<sup>[1]</sup>, 测量精度往往受到限制. 噪声使从相近轨道获得的 SAR 图像的相干性下降, 并破坏干涉条纹. 为了精确地重建地形, 在 InSAR 处理中必须对干涉图进行滤波. 对干涉图滤波的目的是减小相位噪声, 并修复干涉条纹, 以提高二维相位展开算法的运算速度和可靠性. 干涉图可被视作二维的随机过程, 干涉相位在较小范围内保持不变. 传统的多视滤波器实质上是二维滑动平均, 当地形高度恒定, 且平坦地球相位已被去除时, 滤波结果是对干涉相位的最大似然估计<sup>[2,3]</sup>. 视数适当时, 多视滤波器能有效降低相位噪声的同时提高干涉图的信噪比. 多视滤波器实现起来非常简单, 运算速度快, 是 InSAR 处理中的标准工具. 从频域的角度理解多视滤波器, 它所实现的是二维低通滤波, 滤除了通带之外的高频噪声, 但也可能破坏来自陡峭地形的致密干涉条纹. 滑窗越大, 这种效应越明显. 多视滤波器会引起对地形的欠估计. 我们将采用地形自适应滤波器来提高滤波性能, 滤波过程中使用带通滤波器, 利用局部干涉图的二维谱确定其参数, 通带的位置随地形的起伏而变化. 这种基于局

部频率估计的自适应滤波器能够在保持干涉条纹的前提下去除相位噪声, 并有效地提高各种相位展开算法的性能.

近年来的文献中, 有多种实现干涉图自适应滤波的方法, 例如文献[4~6]提出的方法分别基于 MUSIC 算法、2-D FFT 和能量分离法, 而文献[7]提出的方法则基于对局部统计量的分析. 本文第 2 节对地形自适应滤波器的一般性结构作出描述之后, 第 3 节提出一种基于 Chirp-Z 变换的滤波方法, 给出对 X-SAR 录取的 Etna 火山干涉数据的滤波结果, 并与传统的多视滤波器进行比较. 第 4 节为本文结论.

### 2 关于地形自适应滤波器结构的描述

二幅作干涉用途的单视 SAR 复图像可以定义为

$$\begin{aligned}s_1 &= C + n_1 \\ s_2 &= C e^{-j\phi_T} + n_2\end{aligned}\quad (1)$$

其中,  $C$  为二幅图像的公共部分,  $n_1$ 、 $n_2$  为热噪声、时间及空间解相关噪声的总和, 是相互独立的复高斯噪声,  $\phi_T$  代表干涉相位. 干涉图由  $s_1$  和  $s_2$  共轭相乘得到,

$$I = s_1 s_2^* = |C|^2 e^{j\phi_T} + C n_2^* + C^* n_1 e^{j\phi_T} + n_1 n_2^* \quad (2)$$

求取  $I$  的数学期望, 则

$$\phi_T = \text{Arg}(E(I)) \quad (3)$$

可以通过在空间的平均来代替数学期望,求得干涉相位的估计值

$$\phi_T = \text{Arg}\left(\sum_{j=0}^{N_j-1} \sum_{k=0}^{N_k-1} I(j, k)\right) \quad (4)$$

(4)式可以理解为用滑动平均,即用多视滤波器实现对干涉图上每一点相位的估计,  $N_j$  与  $N_k$  的乘积被定义为滤波器的视数。

但事实上,由于地形总是存在起伏,  $\phi_T$  不可能保持常数,只有当地形平坦,且视数较低时,才能利用式(4)进行干涉相位估计。在地形坡度大时,多视滤波器将破坏干涉条纹,因此作如下处理。

将式(2)的第一项分解为

$$e^{j\phi_c} |C|^2 e^{j(\phi_T - \phi_c)} \quad (5)$$

其中,  $\phi_c$  反映地形的大致轮廓,它的变化决定干涉条纹的空间频率,而  $\phi_T - \phi_c$  反映地形细节。如果我们能够从干涉图中提取地形轮廓,式(2)可写为

$$I = e^{j\phi_c} [ |C|^2 e^{j(\phi_T - \phi_c)} + C n_2^* e^{-j\phi_c} + C^* n_1 e^{j(\phi_T - \phi_c)} + n_1 n_2^* e^{-j\phi_c} ] \quad (6)$$

由于去除了显著变化的部分  $e^{j\phi_c}$ , 式(6)括号内的部分可以参照(4)式用多视滤波器进行相位估计,

$$(\phi_T - \phi_c) = \text{Arg}\left(\sum_{j=0}^{N_j-1} \sum_{k=0}^{N_k-1} (I(j, k) e^{j\phi_c})\right) \quad (7)$$

在实际的滤波过程中,我们通过条纹检测获取  $e^{j\phi_c}$ 。滤波器在空间域可表示为

$$\{ [I(j, k) (h_1(j, k))^*] \otimes h_0(j, k) \} h_1(j, k) \quad (8)$$

其中,  $h_0(j, k)$  是多视滤波器<sup>[2]</sup>的冲激响应,  $h_1(j, k)$  为通过条纹检测得到的  $e^{j\phi_c}$ , 符号  $\otimes$  代表二维卷积。在本文中,采用局部频率估计的方法进行条纹检测。

上述滤波器是地形自适应的,  $h_1(j, k)$  在地形自适应滤波器中起关键作用。  $h_1(j, k)$  的设计应该在保证反映地形变化趋势的前提下使  $h_1(j, k)$  相位奇异点最少,即保持相位条纹的连续性。这样做可以避免滤波过程破坏原有的干涉图,或在干涉相位图中引入额外的奇异点。

### 3 地形自适应滤波器的实现

#### 3.1 用二维 Chirp-Z 变换进行干涉图条纹检测

如果在干涉图中截取一小部分,其干涉相位可以用平面近似,我们通过局部空间频率估计确定相位平面的斜率。有多种方法能够实现频率估计,其中二维傅立叶变换得到的结果是最大似然的<sup>[8]</sup>。在具体实现过程中,由于二维 DFT 的量化效应,使估计结果方差过大,必须通过内插来提高估计精度。也就是在计算二维频谱时,频率单元应小于  $f_s/M$ , 其中  $f_s$  为采样率,  $M$  为被截取干涉图的尺寸。频谱幅度最大值对应于谱中心,即空间频率估值。

用补零二维 FFT 可以简便地实现内插,并且当补零点数增加时,结果逼近最大似然估值。补零二维 FFT 同样等效于匹配滤波器组,但频率间隔更小,滤波器个数更多。

二维频率估计的克拉美-罗限为<sup>[8]</sup>

$$\begin{aligned} \text{var}_j &= \frac{6}{r_{s/n} N (N_j^2 - 1)} \\ \text{var}_k &= \frac{6}{r_{s/n} N (N_k^2 - 1)} \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $r_{s/n}$  为输入信噪比,  $N_j$  和  $N_k$  是输入信号矩阵尺寸,  $N = N_j N_k$ 。由式(9)可知,若要求频率单元小于克拉美-罗限,则补零后信号矩阵的尺寸  $L_j$  和  $L_k$  应满足

$$\begin{aligned} \frac{1}{L_j} &\leq \sqrt{\frac{6}{r_{s/n} N (N_j^2 - 1)}} \\ \frac{1}{L_k} &\leq \sqrt{\frac{6}{r_{s/n} N (N_k^2 - 1)}} \end{aligned} \quad (10)$$

根据式(10),当被截取干涉图尺寸为  $16 \times 16$ , 信噪比为 0dB 时,需要计算  $128 \times 128$  点补零 FFT。实际运算过程中,为了进一步减小量化效应,用  $256 \times 256$  点补零 FFT 进行局部频率估计。

在频谱的主瓣中进行内插可以大大提高计算效率。使用 Chirp-Z 变换<sup>[9]</sup>能够在指定的频率范围内减小频率采样间隔。仍然以  $16 \times 16$  的局部干涉图为例。我们用  $16 \times 16$  点 FFT 先找出频谱主瓣位置,再通过 3 个  $32 \times 32$  点 FFT 实现 Chirp-Z 变换,可以达到  $256 \times 256$  点补零 FFT 的估计精度。通过 Chirp-Z 变换进行频率估计,计算量仅为补零 FFT 的三十分之一。

图 1 是用局部频率估计进行条纹检测的例子。

由图可见, (b) 是 (a) 的线性近似,但二者之间条纹位置存在平移。通过对初始相位的估计,可得图(c), 相量表示为

$$e^{j\varphi(f_j, f_k)} = e^{j2\pi(f_j + f_k)\phi_0} \quad (11)$$

其中,  $f_j, f_k$  为二维空间频率分量,  $\phi_0$  为初始相位。  $e^{j\phi_0}$  可以按下式进行估计

$$e^{j\phi_0} = \frac{\sum_{j=j_0, k=k_0}^{j=j_0+N_j-1, k=k_0+N_k-1} I(j, k) e^{-j2\pi(f_j + f_k)\phi_0}}{\left| \sum_{j=j_0, k=k_0}^{j=j_0+N_j-1, k=k_0+N_k-1} I(j, k) e^{-j2\pi(f_j + f_k)\phi_0} \right|} \quad (12)$$

$I(j, k)$  为被截取干涉图,  $j \in [j_0, j_0 + N_j - 1]$ ,  $k \in [k_0, k_0 + N_k - 1]$ , 截取干涉图尺寸为  $N_j N_k$ 。图(d)是干涉图(a)与其线性近似模型(c)之间的相位差,在图中可以观察到奇异点。

#### 3.2 抑制马赛克效应

应用前面介绍的方法,将干涉图分为小块,对每一块分别用二维 Chirp-Z 变换进行条纹检测,然后根据式(11)对小块干涉图进行线性近似。对图 2(a)中 Etna 火山的部分干涉图进行

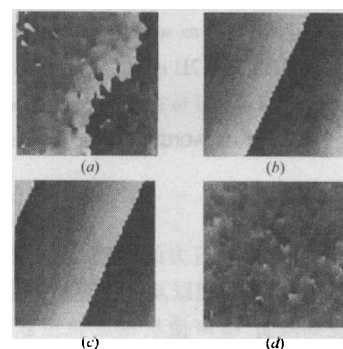


图 1 条纹检测, (a) 截取的小块干涉图; (b) 局部频率估计结果; (c) 对 (b) 的初始相位进行修正后的结果; (d) (a) 和 (c) 之间的相位差

上述处理,得到图 2(b)中的线性近似结果。

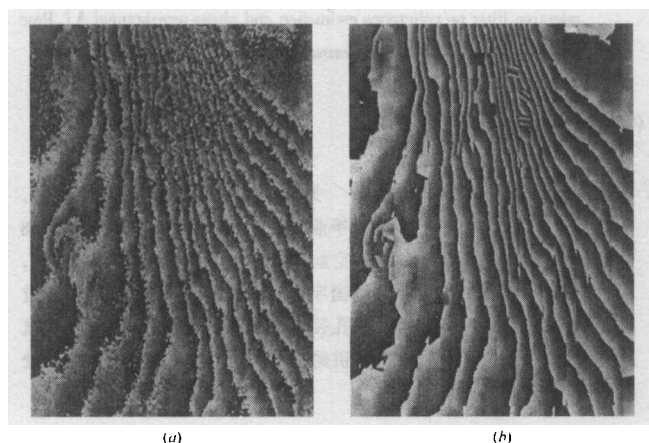


图 2 干涉图的线性近似,(a)Etna 火山的部分干涉图;  
(b)对(a)的线性近似结果

由于一阶近似和噪声导致频率估计不精确,在图 2(b)中能够清楚地观察到马赛克效应。为了消除这一现象,我们将频率估计的窗口相互重叠百分之五十,并将估计所得相量在锥削加权之后重新进行叠加<sup>[10]</sup>。这一处理方法有效地消除了马赛克效应,并避免了对干涉图上每一点都进行频率估计,可视为对分块估计结果的内插,处理结果如图 3 所示。

图 3 中线性相位模型的奇异点密度很低,相位条纹清晰。在后续处理步骤中,将利用它对于干涉图进行地形自适应滤波,在保持地形细节特征的基础上减小干涉相位估计的方差。

### 3.3 干涉图的自适应滤波

由式(8)可见,与传统的多视滤波器相比,本文提出的地形自适应滤波器的特点在于提取了干涉图线性相位模型  $h_1(j, k)$ ,并将其从干涉图中扣除后再进行平滑处理。从

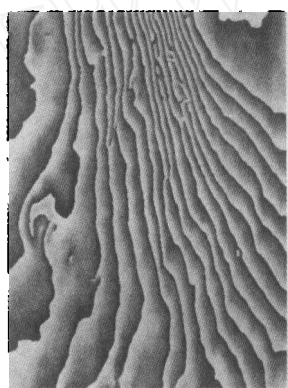


图 3 抑制马赛克效应后的干涉图线性近似结果

频域的角度加以解释,滤波器将频谱中心移至零,再进行低通滤波。之后,将平滑过的信号重新调制到原来谱中心的位置。上述操作等效于对于干涉图进行带通滤波,带通滤波器的中心频率需要根据干涉图的局部空间频率进行自适应调整,因此滤波器是空变的。

由于滤波器的参数根据干涉图的局部频谱不断调整,致密的干涉相位条纹将得到很好的保持。下面我们给出自适应滤波器和传统的多视滤波器的滤波结果。

为比较二种滤波器的性能,我们选择陡峭地形的干涉图进行处理,以考察它们保持干涉条纹的能力。图 4(a)和(b)中自适应和多视滤波器的滑窗宽度均取  $7 \times 7$ ,图 4(c)和(d)中自适应和多视滤波器的滑窗宽度为  $13 \times 13$ 。在干涉图四周,条纹频率较低,二种滤波器都能够取得满意的结果;而在干涉图

的中央,由于干涉条纹非常致密,二者性能的差别十分明显,图 4(b)、(d)中的干涉条纹都遭到破坏,而(a)、(c)中干涉条纹保持较好,视数增加并未引起干涉条纹的模糊。

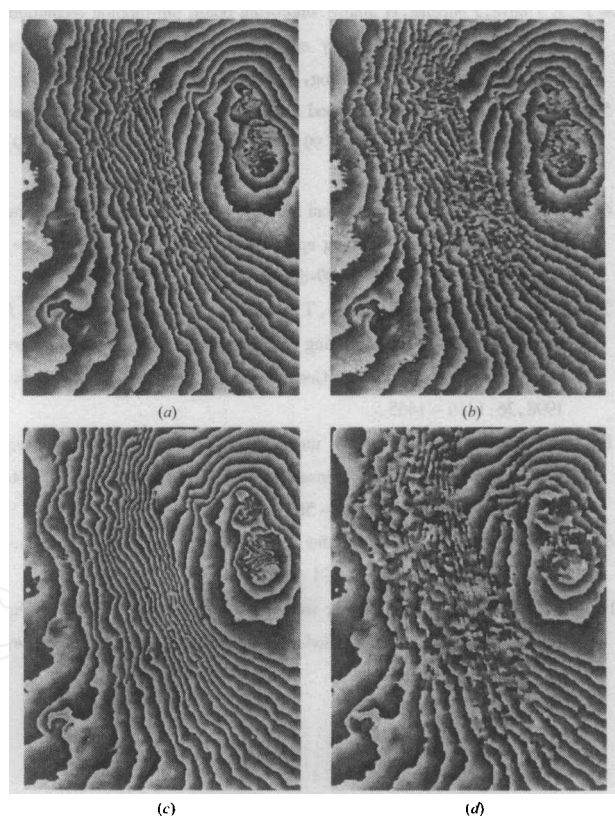


图 4 地形自适应滤波器与多视滤波器性能比较,  
(a)地形自适应滤波器处理结果,滑窗宽度  $7 \times 7$ ;  
(b)多视滤波器处理结果,滑窗宽度  $7 \times 7$ ;  
(c)地形自适应滤波器处理结果,滑窗宽度  $13 \times 13$ ;  
(d)多视滤波器处理结果,滑窗宽度  $13 \times 13$

线性相位模型  $h_1(j, k)$ 可以用于从干涉数据中去除空间解相关效应,从而改善相干性估计,关于这一点文[11]已进行了讨论。

## 4 结论

与传统的多视滤波器相比,地形自适应滤波器能够在抑制相位噪声的同时保持干涉条纹。本文提出了一种基于局部频率估计的地形自适应干涉图滤波器,并经过了实测数据的验证。该自适应滤波器的计算效率较高,在 HP B180 工作站上,我们对  $1024 \times 4096$  点的干涉图进行了处理,运算时间为 20 分钟。

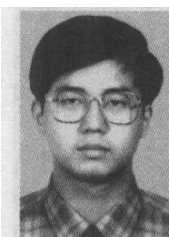
致谢 作者感谢德国宇航院提供 X-SAR 干涉数据。

## 参考文献:

- [1] H Zehker, J Villasenor. Decorrelation in interferometric radar echo[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Sept. 1992, 30 (5):950-959.
- [2] E Rodriguez, J M Martin. Theory and design of interferometric synthetic

- aperture radars[J]. IEEE Proceedings-F, 1992, 139(2): 147 - 159.
- [3] R Bamler, P Hartl. Topical review, synthetic aperture radar interferometry[J]. Inverse Problems 14, 1998: R1 - R54.
- [4] E Trounev, J Nicolas, H Maitre. Improving phase unwrapping techniques by the use of local frequency estimation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Nov. 1998, 36: 1963 - 1972.
- [5] M Hubig. A maximum likelihood a priori filter for interferometric phase [A]. Proceedings of IGARSS'99[C]. Hamburg, Germany, July 1999: 482 - 484.
- [6] D Perea-Vega, I Cumming. Local frequency Estimation in interferograms using a multiband pre-filtering approach[DB/OL]. <http://www.ece.ubc.ca/sar/papers/FRINGE99-diego.pdf>, November 21, 2001.
- [7] J S Lee, K P Papathanassiou, T Ainsworth, M Grunes, A Reigber. A new technique for noise filtering of SAR interferometric phase images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Sept. 1998, 36: 1456 - 1465.
- [8] U Spagnolini. 2-D phase unwrapping and instantaneous frequency estimation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, May 1995, 33: 579 - 589.
- [9] A V Oppenheim, R W Schaffer. Digital Signal Processing[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1975. 321 - 326.
- [10] R Goldstein, C Werner. Radar ice motion interferometry[A]. Proc 3rd ERS Symp on Space at the Service of Our Environment[C]. Florence, Italy, March 1997. 969 - 971.
- [11] D Y Zhu, R Scheiber, Z D Zhu. Impacts of an efficient topography adaptive filter on coherence estimation and phase unwrapping[A]. Proc EUSAR 2000[C]. Munich, Germany, May 2000. 319 - 322.

### 作者简介:



**朱岱寅** 男, 1974 年 7 月生于江苏无锡, 1996 年本科毕业于东南大学无线电工程系, 1998 年在南京航空航天大学电子工程系获硕士学位, 1999 年在德国宇航院(DLR)高频技术研究所进行干涉合成孔径雷达信号处理研究, 现为南京航空航天大学讲师, 研究方向为雷达成像和信号处理。



**朱兆达** 男, 1939 年 3 月生于山东青岛, 1960 年毕业于南京航空学院, 现为南京航空航天大学电子工程系教授、博士生导师, 中国电子学会会士, IEEE 高级会员, 研究方向为: 雷达信号检测与处理。