

# 干涉合成孔径雷达相位滤波的一种新算法<sup>1</sup>

全 刚 荆麟角

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘 要** 该文着重就目前国际上研究的一个热点——干涉合成孔径雷达成像中的相位滤波问题进行了讨论。提出了一种新的相位滤波方法,可适应干涉条纹方向的变化,十分适用于对干涉条纹密集的区域进行滤波。通过对德国 X-SAR 数据的处理检验该方法的效果,结果相当理想。此外,这种方法实现起来相当简单。

**关键词** 干涉合成孔径雷达 (In-SAR), 干涉条纹, 相位滤波

**中图分类号** TN951, TN713

## 1 引 言

In-SAR 测量技术是雷达遥感技术中的最新领域,诞生于七十年代。它具有覆盖面积大,空间分辨率高,高程精度高的优点,并且可以全天时、全天候的工作,是获取三维数字高程模型 (DEMs) 的一种最有效的方法。因而一经出现便迅速成为了遥感成像领域中的一个热点。

In-SAR 技术是在合成孔径雷达 (SAR) 基础上发展起来的,与之不同的是 In-SAR 利用的是 SAR 单视复图像的相位信息。对同一地区进行两次 SAR 成像,得到两幅单视复图像,两次成像时雷达的视角要有轻微的差别<sup>[1]</sup>,使得复图像的相位信息有差别,利用这个相位差别可生成干涉相位图。两次成像的天线要在垂直轨道的方向上有一个距离差,称为基线长度,从而引入视角差。干涉相位图中含有与地形信息有关的相位信息(以  $2\pi$  为模的卷叠相位),通过相位展开提取这个相位信息便可生成三维数字高程模型 (DEMs)<sup>[2]</sup>。

在 In-SAR 成像处理中,最重要的步骤是相位展开,而相位展开的结果又直接受干涉相位图质量的影响,如果干涉相位图的质量很差,相位展开根本无法得到正确的结果。事实上,基于基线长度和系统本身性能的影响,干涉相位图将不可避免的引入大量的相位噪声,直接进行相位展开是不可能的。必须要对相位图滤波以降低相位噪声,改善其质量。最常用的相位滤波方法是多视平均处理<sup>[2]</sup>,它的代价是降低了空间分辨率。多视平均所用的滤波窗口一般为矩形,对于其内的像素点一视同仁的进行处理,既没有考虑本地噪声的影响,也没有适应干涉条纹方向的变化。这样,在条纹十分密集的地方,此种滤波方法将使条纹搀杂在一起,破坏了相位信息。而在实际应用中,干涉相位图经常是条纹密集而相位噪声较大,因而有必要寻找一种能够适应条纹方向变化的滤波方法。文献 [3] 提出了一种滤波方法,做了这方面的尝试。从其效果来看,不是十分理想,而且方法较为繁琐。本文将介绍一种相对简单的滤波方法,它是对多视平均方法的改进,是根据干涉条纹的走向及分布特性提出的,能够在一定程度上达到自适应滤波的效果。

在本文的第 2 节,将介绍与干涉相位图有关的一些基本概念。第 3 节详细介绍滤波算法。第 4 节将用此方法对德国航天飞机的 X-SAR 数据进行滤波,以检验效果。

## 2 一些相关的原理

**2.1 多视处理方法的原理** 多视处理是最常用的滤波方法,它实质上是在时间域内对信号进行空间平滑,通常是对相邻像素点进行平均,表示为

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_1(i) y_2^*(i) = |S| e^{j\phi} \quad (1)$$

<sup>1</sup> 2000-06-16 收到, 2000-09-25 定稿

其中  $y_1(i), y_2(i)$  为两幅单视复图像, \* 代表共轭,  $n$  为多视数,  $\phi$  为干涉相位。多视处理后的干涉相位图中的相位噪声与多视数  $n$  以及图像复相关系数的幅度有关<sup>[4]</sup>。复相关系数定义如下:

$$\rho = \frac{E\{y_1 \cdot y_2^*\}}{\sqrt{E\{|y_1|^2\} \cdot E\{|y_2|^2\}}} = |\rho|e^{j\theta} \quad (2)$$

$|\rho|$  即为复相关系数的幅度。需要说明的一点是, 增加多视数并不能改善图像的相关性, 但可以降低干涉相位  $\phi$  的标准差<sup>[5]</sup>, 从而降低相位噪声。相位噪声的标准差可表示为多视数和相关系数的函数, 随着多视数的增加和相关系数的加大, 相位噪声的标准差会减小。

**2.2 相关图** 利用复相关系数的幅度, 还可以做出相关图。方法是, 以  $K \times K$  大小的子窗口, 步长 1 像素, 在两幅单视复图像中同步移动。每移动一步, 用 (2) 式计算相关系数, 代表子窗口中心处像素点的相关系数。最后整个图像中各像素点的相关系数的幅度便合成一幅相关图。相关图可以反映整个图像的相关性能。并且, 因为相位噪声是相关系数的函数, 从相关图也可得到相位噪声的分布情况, 即相关系数大的区域相位噪声小, 相关系数小的区域相位噪声大。

**2.3 干涉条纹分布特性** 在干涉条纹图中, 同一条纹上的像素点的相位值相近。如用一个条状窗口作用于条纹图上, 当窗口与条纹方向相吻合时, 由于其内的像素点相位值接近, 这些点的标准差应是最小的, 可以利用这一点来识别条纹方向。当然, 由于相位噪声的干扰, 实际中如此识别是很困难的。

还应注意到, 虽然在一幅整图中, 条纹方向的变化是很复杂的, 但这种变化也是一个渐进的过程, 即在相邻的像素间, 条纹方向的变化是很小的, 只有经过了一系列像素点的积累, 条纹方向才会有明显的改变。这一点有助于确定条纹方向。

### 3 改进的相位滤波算法

在进行多视平均处理时, 不再用单一的矩形窗口, 而是采用图 1 所示的 16 个  $9 \times 9$  的窗口。图中每一个小方块代表一个像素, 口代表要进行处理的窗口。也就是说, 只有白色区域内的像素点才做平均, 这就使得滤波窗口有了方向性, 这 16 个窗口代表了 16 个方向, 在滤波时选择与条纹方向相适应的窗口进行滤波即可。

滤波方向的选择是十分重要的。由于干涉相位图的相位噪声很大, 仅用前面所说的相位值标准差的方法是很难正确选择窗口方向的。在此, 利用前面提到的条纹的渐变性能来进行改进。

在干涉复图像中选取一个初始像素点, 以此为中心选择一个方向窗口。这个方向窗口的确定有两种方法: 一是用肉眼观察, 确定方向后作为初始值直接输入; 二是初始像素点选在相位噪声很小条纹十分清晰的地方, 分别将 16 个窗口作用其上, 用计算窗口内相位值标准差的方法选出正确的窗口。

初始像素点选定后, 滤波从该点向周围展开, 滤波窗口以步长 1 像素移动, 每次移动后要确定窗口的方向, 遵循如下的原则:

(1) 干涉条纹渐变性能原则。前面说过相邻像素点间干涉条纹方向变化很小于是在选择当前窗口的方向时, 要参照相邻的上一个像素点的窗口方向, 只从与之相近的几个方向中选取。例如, 上一个像素点的窗口方向确定为图 1 中的 (1), 那么当前窗口方向只从 (1), (2) 和 (16) 三个方向中选取。运用这一原则可使得窗口方向在正确的条纹方向附近漂移, 不会过分偏离。

(2) 相关图加权原则。在图像的有些区域, 相关性能很差而导致相位噪声很大, 条纹几乎分辨不出来。在这种情况下, 仅用上一原则是不够的。在选择窗口方向时应考虑噪声的影响, 因为噪声性能可通过相关图来反映, 所以用它来加权。将备选窗口作用于相关图上, 查看窗口内区域的相关性能, 如相关性能很差, 该窗口不参与选择。我们知道, 一般相关系数幅值  $|\rho|$  大于 0.5 的区域便十分利于干涉处理<sup>[2]</sup>, 由于此时针对的是相关性能很差的地方, 可选取  $|\rho| = 0.3$  作为一个阈值, 如果窗口内大多数像素点的  $|\rho|$  值小于 0.3, 便认为该区域相关性能很差。如果 3 个备选窗口都不符合条件, 那么当前的窗口保持相邻的上一像素点的窗口方向。

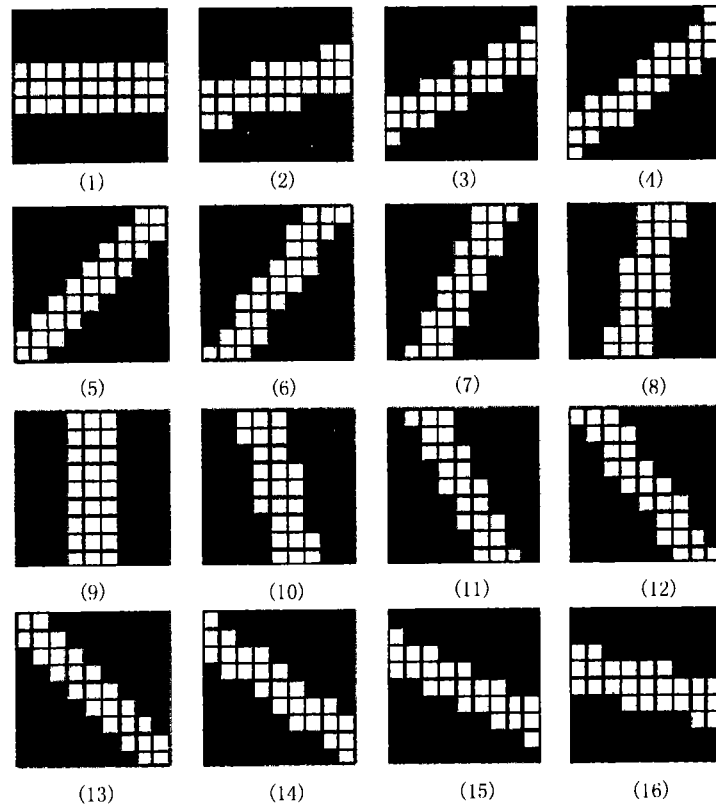


图 1 16 种方向的滤波窗口

(3) 多视平均处理原则。选定窗口后, 要用该方向窗口中所有的像素点来进行多视平均处理。此时不能用相关图来加权, 因为相关系数是一个统计计算的结果, 利用这一结果可以得出某一区域相关性能的好坏, 而不能具体到某一像素点相关性能的好坏。

这一滤波方法可以重复进行, 会使滤波效果更好。另外在用这一方法滤波前, 视干涉相位图的质量, 可用  $3 \times 3$  窗口的多视平均进行一下预滤波, 减少一些相位噪声, 更有利于窗口方向的正确选择。最后要强调的一点是, 窗口方向选择是在干涉相位图中进行的, 而滤波是在干涉复图像中进行。

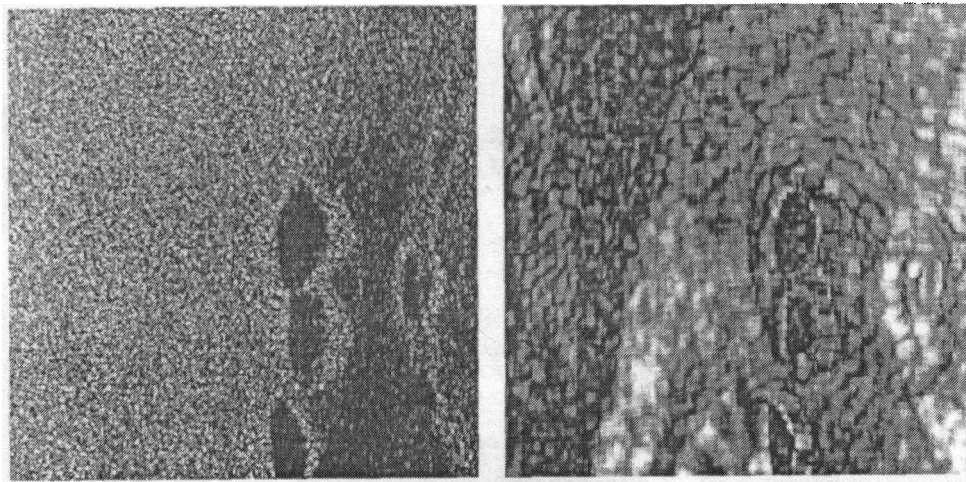
#### 4 滤波效果

在这一节中, 将通过对实际数据的处理来检验这种滤波方法的效果, 所选用的数据为 1994 年德国航天飞机对意大利境内的 Mt. Etna 火山进行观测得到的 X 波段的干涉数据。

实验中选取了火山口附近区域的数据, 大小为  $330 \times 330$  像素。其单视灰度图像、相关图分别由图 2(a), 2(b) 给出。

图 3 给出了滤波结果, 其中 3(a) 为滤波前的干涉相位图, 3(b) 为用本文所述改进方法滤波的结果。为便于比较, 图 4 中还给出了其它一些方法的滤波结果, 其中 4(a), 4(b) 两图为用一般的多视平均处理得到的结果, 窗口大小分别取  $5 \times 5$  和  $9 \times 9$ , 4(c) 为仅用相位值标准差来判别窗口方向时的滤波结果。

观察图 3, 可以看到这种改进多视平均滤波方法效果相当不错, 尤其在条纹密集的区域, 滤波后条纹十分清晰, 基本保持了条纹的信息, 没有造成条纹串扰。而在火山口处的区域, 由于相位噪声很大, 本身并未形成干涉条纹, 对其滤波的结果也没有造成噪声的扩散, 未对周围

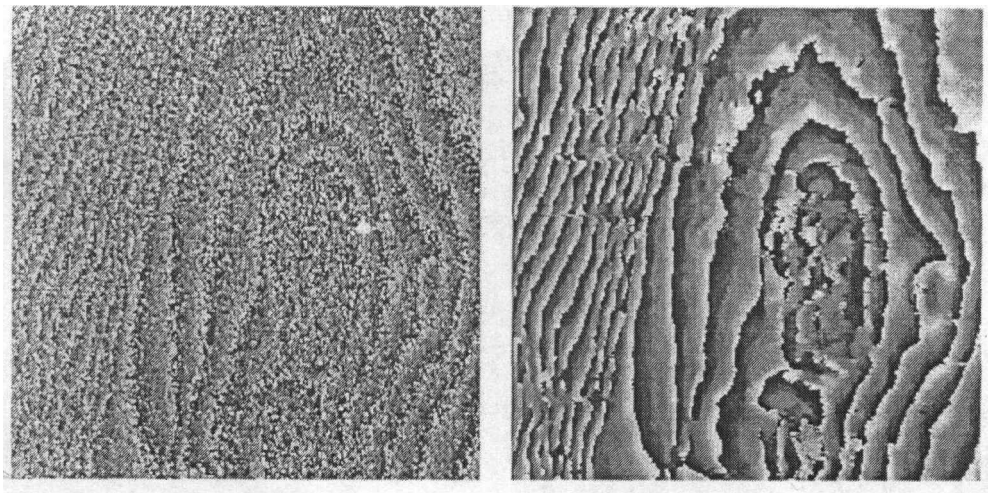


(a) 单视灰度图

(b) 相关图

图 2 Mt.Etna 火山数据

地区造成影响。相比之下，图 4 中其它几种方法的结果在图像右半边条纹较稀疏的地方效果还可以，在左半边条纹密集的地方滤波效果都不理想，或多或少都破坏了条纹的分布，这样会对后面进行的相位展开产生影响。由此可见，本文提出的这种改进的相位滤波算法在条纹密集区域的滤波问题上确实有着相当的优势。



(a) 相位滤波前干涉相位图

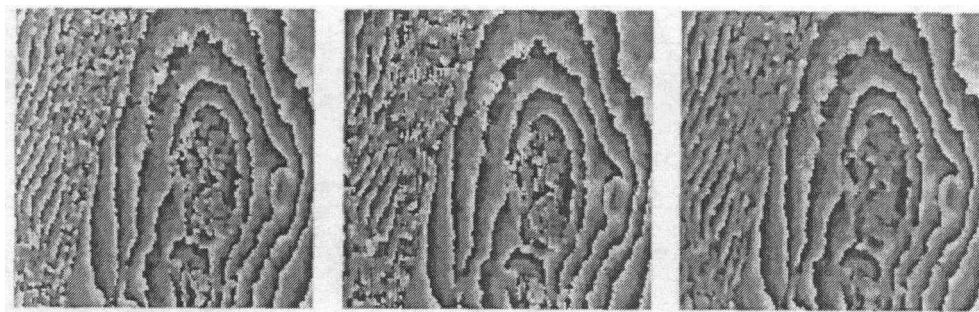
(b) 相位滤波后干涉相位图

图 3 改进的相位滤波算法的效果

## 5 结 论

本文提出了一种新的相位滤波算法，通过 16 个方向不同的窗口与干涉条纹的方向相适应，并依据干涉相位图的一些特性自动确定窗口方向的选择。此方法实现相当简单，效果也很不错，主要不足是对初始值设置的依赖较大，无法完全实现自适应的滤波。本文在自适应的相位滤波方面做了一些尝试，得到了一些有益的结果，相信会对今后这方面的研究有所帮助。

**致谢** 感谢北京航空航天大学的毛士艺老师提供了 X-SAR 数据。



(a)

(b)

(c)

图 4 其它相位滤波算法的效果

## 参 考 文 献

- [1] L. C. Grapham, Synthetic interferometric radar for topographic mapping, Proc. IEEE, 1974, 62, 763-768.
- [2] Joe Zhang, Yi Guo, Interferometric synthetic aperture radar technology, radar remote sensing group, Dept. of Electrical Engineering, University of British Columbia, Technical Report JZ-96-1, Nov. 20, 1996.
- [3] Jong-Sen lee, K. P. Papathanassiou *et al.*, A new technique for noise filtering of interferometric phase images, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1998, 36(5), 1456-1465.
- [4] G. Fornaro, G. Franceschetti *et al.*, Robust phase-unwrapping techniques: A comparison, J. Opt. Soc. Am. A, 1996, 13(12), 2355-2366.
- [5] J.-S. Lee *et al.*, Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric imagery, IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing, 1994, 32(9), 1017-1028.

## A NEW PHASE NOISE FILTERING ALGORITHM OF INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR

Quan Gang    Jing Linjiao

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

**Abstract** This paper discusses the phase noise filtering problem for Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometric phase images. A new noise filtering algorithm, which can adapt to the direction of fringes, is developed. This algorithm is useful especially for tightly packed fringes. The algorithm can be carried out easily. Using SIR-C/X-SAR repeat-pass generated interferograms, the effectiveness of this filter is tested.

**Key words** Interferometric synthetic aperture radar, Interferometric fringe, Phase noise filtering

全 刚: 男, 1974 年生, 学生, 干涉 SAR 成像算法.

荆麟角: 男, 1941 年生, 研究员, 微波遥感和数字信号处理.