

基于残差点的干涉相位图自适应滤波

杨磊 冯茜 王志刚

(解放军信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘要 为了能有效地对 InSAR 干涉相位图进行滤波, 利用残差点矩阵作为滤波控制因子, 对两种干涉相位图滤波方法进行了改进。该措施在不破坏致密的干涉条纹的情况下, 通过引用干涉相位图的残差矩阵, 对不同区域的图像采用不同强度的滤波器来实现自适应的降噪, 同时详细描述了滤波方法的实施步骤, 并用 ERS-1 重复轨道数据进行了验证, 结果表明, 该改进方法可取得良好的滤波效果。

关键词 干涉 SAR 相位图 残差点 滤波

中图分类号: TP391.41 TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)11-1976-04

Residues-based Adaptive Approach for Phase Image Noise Reduction

YANG Lei, FENG Qian, WANG Zhi-gang

(Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

Abstract In this paper, residues matrix is used as the factor of filtering for processing effectively phase image. Two kinds of filters for phase image are modified utilizing residues matrix. Modified filters have different filter intensities for different areas of phase image according to noise condition. Therefore they can realize an adaptive filtering effect and can preserve fine details in the interferogram. We describe the implementation of filters in detail. By using interferograms data generated by ERS-1 repeat-pass, their effectiveness is tested.

Keywords interferometric synthetic aperture radar(InSAR), phase image, residue, filtering

1 引言

InSAR (interferometric synthetic aperture radar) 因具有全天候、能获得大测绘带宽和高精度的地形高度信息等优点, 成为目前遥感领域的研究热点。在 InSAR 数据处理过程中, 干涉相位图由两幅配准的 SAR 复图像共轭相乘得到, 但由于 InSAR 系统中斑点噪声、数据处理噪声、地面背景干扰、基线相关损失等因素的存在, 使得 InSAR 图像的信噪比很低^[1], 如果不进行有效的降噪处理, 则势必会严重影响下一步相位解缠的效果, 甚至会因噪声过大和产生大量残差点而造成相位解缠的失败。尽管已有的滤波方法, 如基于局部频率估计的地形自适应于

干涉相位图滤波^[2]、Goldstein 自适应滤波^[3,4]等都能在一定程度上对干涉相位图中的噪声进行抑制, 但是由于上述方法并不完全是基于干涉相位图本身特点设计的, 以致于在有些情况下不能很好地适用于相位图的滤波。由于残差矩阵作为干涉相位图特有的评价指标直接反映了相位图的噪声情况, 并且更影响着下一步的相位解缠过程, 特别是针对枝切法相位解缠, 可是解缠前相位图滤波的最终目的并不是要除去噪声, 而是要使其残差点数减少到某种可接受的水平, 一般而言, 噪声大的地方, 残差点也相应地密集, 但情况并不总是这样, 因此用残差矩阵作为调整滤波强度的指标会更加科学, 本文在分析已有降噪方法原理的同时, 直接利用残差点矩阵^[5]作为滤波控制因子, 对两种干涉相位图自适应滤波方法

收稿日期: 2005-12-20; 改回日期: 2006-09-10

第一作者简介: 杨磊 (1974 ~), 男, 讲师。现为信息工程大学博士生。主要研究方向为干涉合成孔径雷达的成像处理和雷达信号处理。已发表论文 10 余篇。E-mail: goldstone18@126.com

进行了改进。实验结果表明,改进后的方法不但能有效抑制噪声,使得残差点的密集度满足解缠条件,同时也能较好地保持干涉相位图的边缘和细节信息。

2 基于局部频率估计的地形自适应滤波^[2]

根据地形总是存在起伏及直接对图像进行多视处理,将有可能损失干涉条纹细微信息的事实,该滤波器通过对复图像进行分块处理,并对每一块图像进行条纹检测来获取 $e^{j\varphi}$ ($e^{j\varphi}$ 反映了地形的大致轮廓,它的变化决定了干涉条纹的空间主要频率分量, φ 为与主要系数对应的相位),并将其提取出来,以避免滤波器的破坏,在多视处理后,再将这个条纹加上,这样做就可以避免滤波过程破坏原有干涉相位图中主要条纹的缺点,同时可保持相位条纹的连续性。滤波器在空间域中表示方法为

$$\{[I(j,k)(h_1(j,k))^*] \otimes h_0(j,k)\} h_1(j,k) \quad (1)$$

其中, $h_0(j,k)$ 是多视滤波器的冲激响应, $h_1(j,k)$ 为通过条纹检测得到的 $e^{j\varphi}$, 符号 \otimes 代表 2 维卷积, $*$ 代表复数共轭。式(1)中, $h_0(j,k)$ 是一个固定空域滤波器。具体实验时,分别选取大小分别为 7×7 和 13×13 两种滑动窗口进行空域滤波,而这样往往会使得干涉相位图中信噪比较高的区域,由于滤波作用过强而导致有用信息过多损失;在信噪比较小的区域,因为滤波效果过弱而导致噪声不能有效去除。同时由于噪声的严重程度并不是始终和残差点的密集程度保持一致,因此用信噪比作为滤波强度的参考依据不够精确。针对以上情况,本文利用干涉相位图的残差矩阵作为动态选择滤波器参数的依据,提出了一种基于残差点的地形自适应滤波器,这不仅使得滤波器具有自适应的能力,更重要的是直接用残差点作为滤波强度的指标,可使滤波更具准确性。

3 基于残差点的地形自适应滤波

为了克服地形自适应滤波器的缺点,需对其进行改进,措施如下:

(1) 提取图像块中的残差点个数,并计算图像块中残差点所占块总像素的百分比,也就是残差点的密度。实践表明,干涉相位图残差矩阵能有效反映干涉相位的噪声特性,即残差点图中,残差点密集的区域对应着干涉相位图中去相关严重、相位噪声

大的区域;而残差点稀疏的区域则对应着相位噪声较小、条纹清晰度好的区域。残差点密度的计算公式为

$$\rho = v/(m \times m) \quad (2)$$

其中, v 为图像块中的残差点数, $m \times m$ 为图像块的大小,本文选择 32×32 pixels。

(2) 频域插值。滤波的时候,图像块要进行空域 2 维补零及进行频域插值,将其变为 128×128 pixels 大小。这样一方面可减少栅栏效应,使得频谱包络更加平滑、滤波的频率间隔更加精细,滤波器的设计也可做到更加精确;另一方面是基于检测局部条纹的需要。由于 2 维 DFT 的量化效应,使得估计结果方差过大,因此需通过内插提高估计精度,使估值逼近其最大似然值。具体做法就是图像插值后,再进行 2 维傅里叶变换,并估算出最大谱峰的位置 $[i, j]$ 。当然也可以采用 Chirp-Z 变换^[2],以减少计算量。

(3) 根据不同图像块所对应的 ρ 来动态地改变图像块的滤波器。本文选用频域汉宁滤波器替代原方法中的空域滤波器。汉宁窗滤波器构造如下:

$$R = \text{hann}(128) \quad (3)$$

R 是符合汉宁窗分布的 128 维的行向量。

$$M = (Q^T R) \times (R^T Q) \quad (4)$$

其中, Q 为 128 维的单位行向量, $Q = [1 \cdots 1, 1]$ 。 \times 代表矩阵对应元素的乘积, T 代表转置。这时 M 为对应频域的 2 维母滤波器。

若将不同图像块的 ρ 作为控制因子,则根据母滤波器可产生相应的具有不同滤波强度的滤波器。

$$R = \left[\overset{n/2}{0 \cdots 0}, 0, \text{hann}(128 - n), \overset{n/2}{0 \cdots 0}, 0 \right] \quad (5)$$

其中

$$n = \text{INT}(64 \times \rho / \rho_{\max}) \quad (6)$$

其中, $\text{INT}()$ 为取整函数, ρ_{\max} 为图像中最大的残差点密度。

当然当 ρ 大于某个值 ρ_n 时,可使 $\rho = \rho_n$, 先做截断处理,这时 $\rho_{\max} = \rho_n$; 然后,再利用式(4)计算出不同的 ρ 所对应的滤波器 M 。

由构成方式可知,对于 ρ 大的地方,其所构造出的滤波器的频带相应地也更窄,滤波强度也就越强,反之亦然。本文中 $\rho = \rho_{\max}$ 时,对应最强的滤波器 ($n = 64$)。

(4) 随后将滤波器的中心循环平移到对应图像块频谱最大峰值所在的位置 $[i, j]$,先对图像进行滤波,再对结果进行反傅里叶变换;然后取变换后图像的前 32×32 个值作为滤波后的图像值。

设进行滤波处理的干涉复图像块为 $Ce^{j\psi}$,则对其进行补零处理后,再进行如下滤波即可。

$$\tilde{C}e^{j\psi} = DFT^{-1}(DFT(Ce^{j\psi}) \times M) \quad (7)$$

这里, $\tilde{C}e^{j\psi}$ 为最终处理后的图像

(5) 以此类推,让相互重叠^[3]50%的滤波窗在整个干涉相位图上进行上下左右平移,并对每次平移后搜索窗中的小块图像采用上述步骤处理,然后将结果叠加就可完成干涉相位图的滤波。由于对图像进行重叠处理起到了多视平均的作用,因而这种处理步骤能在某种程度上弥补由于分块处理而造成的马赛克效应的影响。

4 Goldstein 自适应滤波

滤波前,首先对整个图像进行分块处理。设用于进行滤波处理的干涉复图像块为 $Ce^{j\psi}$ 。滤波时,先对处理窗中的干涉相位图进行 2 维离散傅里叶变换(discrete Fourier transformation, DFT),

$$\hat{C}e^{j\psi} = DFT(Ce^{j\psi}) \quad (8)$$

式中, ψ 为中间处理后的相位。

然后对 $\hat{C}e^{j\psi}$ 进行加权处理,即将变换后结果的每一点都乘以本身模值的 α 次方,再对其进行反傅里叶变换。即

$$\tilde{C}e^{j\psi} = DFT^{-1}(|\hat{C}|^{\alpha} \hat{C}e^{j\psi}) \quad (9)$$

这里 α 是一个固定的倍乘系数, ψ 就是最终滤波后的相位。

5 基于残差点的 Goldstein 自适应滤波

这里的 α 同样可以用 ρ 来控制,即 $\alpha = \rho/\rho_{max}$,这样就可以使得 α 随着图像块的实际噪声情况来动态改变滤波的强度。这样的措施可使得图像频谱中幅值较大的频率得到较大的权值,幅值较小的频率给予较小的权值。由于这样在某种程度上,可使代表有用信号的幅值较大的强信号与代表噪声的幅值相对较小的弱信号的分离更加明显,从而达到增强有用信号、抑制噪声的目的。

此外,也有用相关系数作为空变 α 的控制因子

的^[3],但需要指出的是,干涉相位图滤波的目的主要是为了减少残差点个数,以使相位解缠能顺利进行。因此笔者认为,用相关系数不如用残差点作为控制变量更直观、精确,此外相关性还和卫星的波段、极化方式有关。

6 实验结果

本文采用大小为 512×512 pixels 的 ERS-1 卫星的重复轨道的干涉数据,用上述不同的方法进行滤波处理,并对比实验结果。图 1(a)为未进行滤波的干涉相位图,由于大量噪声的污染,造成干涉条纹非常模糊,残差点数多达 67 050 个。图 1(b)为干涉相位图的残差点分布图,从图中可以看出,残差点的密集程度与干涉相位图中的噪声情况相互对应,所以残差点的分布情况完全可以作为干涉相位图滤波的控制因子。图 1(c)显示的是干涉相位图中不同图像块中残差点密度的直方图。由图 1(c)中可以看到,残差点的密度分布在 0 到 20% 之间,并集中分布在 0 到 5% 之间。应用上文提到的两种滤波器以及改进的滤波方法对干涉数据进行滤波,其滤波结果如下:

图 1(d)是基于残差点地形自适应滤波中不同滤波强度滤波器的 1 维剖面图。图 1(d)中只画出了几个滤波器。其中最外层的滤波器窗为母滤波器,向内为其衍生出的滤波器,最内层对应滤波最强的滤波器。母滤波器对应于没有残差点的情况,越向内的滤波器频带越窄,滤波强度就越强,其对应着残差点密集的区域。图 1(e)是地形自适应滤波后的效果,由此图可见,残差点有了很大的减少,降为 2 332 个,但由于该滤波器对图像不同部分进行相同强度的滤波,因此在噪声和残差点严重的区域(如图 1(e)的左下与右上区域),仍能看到有噪声的存在。而通过基于残差点的地形自适应滤波,则图中噪声严重的地方就可得到更大的改善,不仅干涉条纹明显清晰,且残差点降为 515 个。另外,Goldstein 自适应滤波($\alpha = 0.7$)同样存在上述问题,而通过改进,噪声严重的地方,也得到了同样的改善。残差点也从 1 865 降到了 252。由表 1 列出了不同滤波器滤波后的定量评价参数。由表 1 可见,不仅残差点数量有很大幅度的降低,标准差也都有不同程度的改善,这说明以上算法对干涉相位图起到了一定的平滑作用。

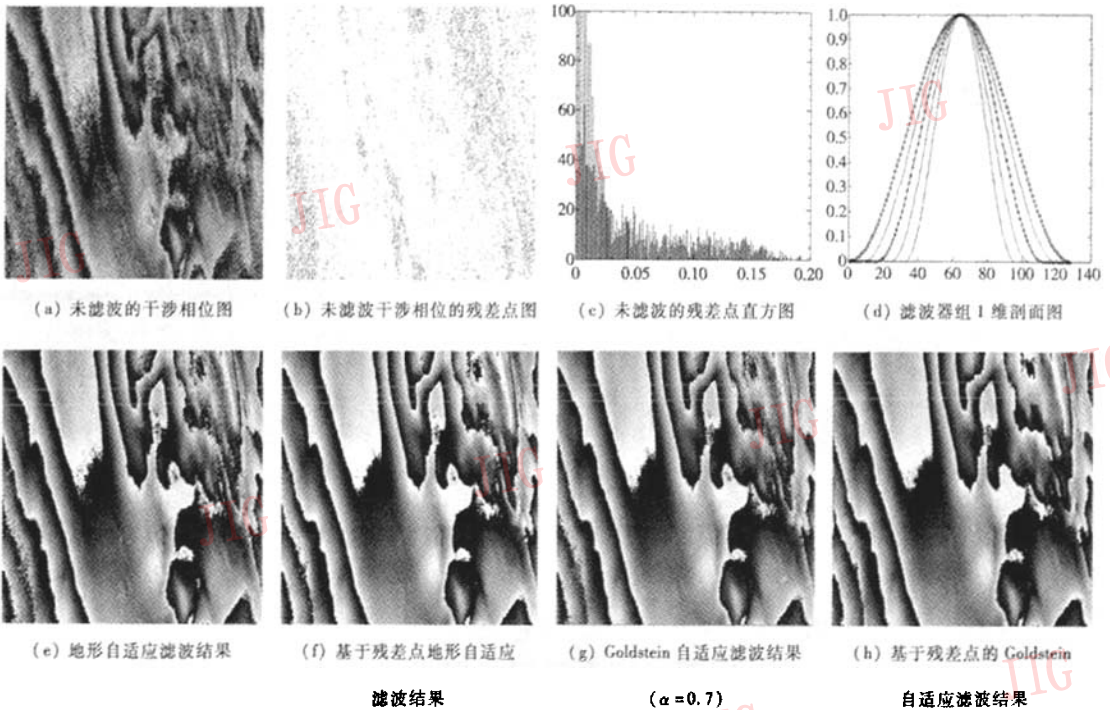


图 1 干涉相位图的残差点图及不同滤波方法滤波结果

Fig. 1 Residual image of phase image and filtered results of different filters

表 1 滤波算法的定量评价参数

Tab. 1 The quantitative evaluation parameter of different filter's performance

	原始图像	地形自适应滤波	基于残差点地形自适应滤波	Goldstein 滤波 ($\alpha=0.7$)	基于残差点的 Goldstein 滤波
残差点数(个)	67 050	2 332	515	1 865	252
标准偏差(rad)	1.872 1	1.859 3	1.855 1	1.858 8	1.854 3

7 结 论

本文利用残差点作为滤波控制因子,提出了两种滤波器的改进措施,使得改进后的滤波器能根据图像的噪声情况自适应地变化滤波强度,从而能很好滤除相位图中的噪声,并能保持条纹的边缘和相位的细节信息。从干涉相位图滤波前后的残差点和标准偏差指标的分析可以看出,改进的滤波器取得了很好的滤波效果。

参考文献 (References)

1 Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping [J]. Radio

Science, 1988, 23(4): 713 ~ 720.

2 Zhu Dai-yan, Zhu Zhao-da, Xie Qiu-cheng. A topography adaptive interferogram filter based on local frequency estimation [J]. Acta Electronics Sinica, 2002, 30(12): 1853 ~ 1856. [朱岱寅,朱兆达,谢求成.一种基于局部频率估计的地形自适应干涉图滤波器[J].电子学报,2002,30(12):1853~1856.]

3 Goldstein R M, Werner C. Radar ice motion interferometry [A]. In: Proceedings of 3rd ERS Symposium on Space at the Service of our Environment [C], Florence, Italy, March, 1997: 969 ~ 971.

4 Baran I, Stewart M P, Kamps B M, et al. A modification to the goldstein radar interferogram filter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2114 ~ 2118.

5 Ghiglia D C, Mastin G A, Romero L A. Cellular-automate method for phase unwrapping [J]. Journal of the Optical Society of America, 1987, 4(1): 267 ~ 280.