基于小波变换的干涉 SAR 图像的降噪方法

袁运能 胡庆东 毛士艺
(北京航空航天大学 电子工程系)

摘 要 根据干涉合成孔径雷达(SAR)图像的噪声来源和性质以及干涉合成孔径雷达信号处理的特点,选择了具有对称性和紧支性的双正交小波变换应用于干涉 SAR 图像的噪声抑制,提出了基于小波标架表示的干涉 SAR 相位图像的降噪算法. 与传统的低通滤波器及中值滤波器处理的结果对比显示,利用小波变换方法处理干涉合成孔径雷达图像以提高干涉相位精度的方法是可行的,并且小波变换方法是基于观测数据的自适应算法.

关键词 合成孔径雷达; 噪声降低; 噪声抑制; 小波; 小波标架
分类号 TN 957.52

干涉合成孔径雷达(SAR)可在几乎不受天气影响的情况下由二维复数 SAR 图像获得大测绘带宽、高精度的地形高度信息. 然而对于干涉 SAR 的处理,相位信息的保持是获得高精度地形拓扑图的关键因素之一. 测量过程中的热噪声与 SAR 图像的相干斑噪声是影响准确获得相位信息的主要噪声来源,同时噪声的存在也严重地影响着二维相位展开算法的效率和精度,以至于使得数字高度图的精度降低. 传统的方法是多视处理、低通滤波和中值滤波等[1,2],这些方法都存在噪声的降低与图像分辨率之间的矛盾. 本文主要研究应用小波变换的干涉 SAR 噪声抑制,实际数据的处理显示本文提出的基于具有对称性和紧支性双正交小波的小波标架表示的干涉 SAR 图像降噪算法是可行的,并且该算法是基于干涉 SAR 图像数据的自适应算法,避免了低通滤波器选择窗口大小等问题.

1 干涉 SAR 图像的噪声来源

根据文献[1],干涉 SAR 图像的噪声来源主要为: ①雷达系统本身引起的热噪声. 这部分属于附加噪声,可以通过提高雷达系统本身的信噪比(SNR)以满足图像质量的要求. 但是由于干涉 SAR 的形成是结合 2 幅 SAR 图像,特别是反射强度较低的区域,干涉 SAR 图像的信噪比(SNR)非常低. ②SAR 图像的相干斑噪声. 由于 SAR 系统的分辨率是有限的,目标表面相对于系统波长比较粗糙,图像中的每一分辨率单元都是由许多散射中心组成的,这些不同散射中心回波矢量的叠加造成 SAR 图像的每一分辨率单元的相位和幅度是随机变化的,这种随机变化就是相干斑噪声. ③天线引起的噪声. 在干涉 SAR 中被称为"去相关"效应. 实际上,由于 2 次测量时天线的位置、下视角等因素的不同使得形成干涉图像的 SAR 图像的几何结构并不完全相同. 这造成 2 幅 SAR 图像信号频率成分发生偏移,信号之间的相干性降低而导致干涉图像的噪声. 因此,此类型的相位噪声主要依赖于天线的基线、雷达的系统带宽、地形的变化等条件.

干涉相位图的噪声中,由天线的几何关系引起的"去相关"噪声可以利用在距离向及方位向的频谱预滤波来降低,本文主要讨论降低干涉图像中热噪声及相干斑噪声等影响的方法.

2 小波变换的基本原理

正是由于噪声干扰的存在,实际处理中无法直接利用单视 SAR 数据准确估计干涉相位. 一般地,低通滤波处理可以有效地降低信号中存在的白噪声,提高信噪比,但其代价是使信号分辨率降低. 信噪比的提高及信号分辨率的保持性能是决定选择滤波器的主要标准. 本文尝试将小波变换应用到干涉合成孔径雷达图像的噪声抑制问题,干涉图像的降噪问题不同于一般图像的降噪,主要目的是获得高精度的干涉相位图像,它涉及 2 幅复 SAR 图像的共轭乘积和取相位运算,要求处理过程中相位保持线性,因此,将采用具有对称性

收稿日期: 1998-03-31 第一作者 男 36 岁 博士生 100083 北京

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和紧支性的双正交小波变换;另一方面,为了更好地保持相位跳变部分定位的精确度,不采用基于小波基的临界取样算法,而采用基于小波标架的过取样算法.

2.1 双正交小波变换

双正交小波变换的概念是由 Cohen, Daubechies[3] 等首先提出的,它采用 2 个不同的小波函数 $\psi(x)$ 和 $\tilde{\psi}(x)$ ($\psi(x)$ 用于分解,而 $\tilde{\psi}(x)$ 称为 $\psi(x)$ 的对偶小波,用于重构),及 2 个不同的尺度函数 $\phi(x)$ 和 $\tilde{\phi}(x)$,与这 2 组小波函数和尺度函数对应的低通、高通滤波器组 $\{h_n\}$, $\{\tilde{h}_n\}$ 和 $\{g_n\}$, $\{\tilde{g}_n\}$ 满足以下关系:

$$\begin{aligned} &H(\omega)\tilde{H}(\omega) + G(\omega)\tilde{G}(\omega) = 1 \\ &g(n) = (-1)^{n-1}\tilde{h}(1-n) \\ &\tilde{g}(n) = (-1)^{n-1}h(1-n) \end{aligned} \tag{1}$$

其中 $H(\omega)$, $\tilde{H}(\omega)$, $G(\omega)$, $\tilde{G}(\omega)$ 分别为 $\{h_n\}$, $\{\tilde{h}_n\}$, $\{g_n\}$, $\{\tilde{g}_n\}$ 的频率响应. 记 $\phi_{j,l}(x) = 2^{-j/2}\phi(2^{-j}x - l)$, $\psi_{j,l}(x) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}x - l)$, $\tilde{\phi}_{j,l}(x) = 2^{-j/2}\tilde{\phi}(2^{-j}x - l)$, $\tilde{\psi}_{j,l}(x) = 2^{-j/2}\tilde{\psi}(2^{-j}x - l)$. 在 (1) 式成立的条件下, $\{\psi_{j,l} \mid j, l \in \mathbf{Z}\}$ 与 $\{\tilde{\psi}_{j,l} \mid j, l \in \mathbf{Z}\}$ 构成 $L^2(R)$ 的双正交小波基. 而 $\psi^{\text{fram}}_{j,l}(x) = \{2^{-j}\psi(2^{-j}(x-l)) \mid j, l \in \mathbf{Z}\}$ 和 $\tilde{\psi}^{\text{fram}}_{j,l}(x) = \{2^{-j}\tilde{\psi}(2^{-j}(x-l)) \mid j, l \in \mathbf{Z}\}$ 则构成 $L^2(R)$ 的双正交小波标架. 有关 2D 离散信号的基于小波标架的分解与合成算法如图 1. 对于给定的 2D 离散信号 $\{f(n,m)\}_{m,n\in\mathbf{Z}}$,通常近似地取 $S^0_{LL}(n,m) = f(n,m)$,则可按图 1 所示的算法进行快速分解与合成[4],此处 $S^j_{LL}(n,m)$, $d^j_{LH}(n,m)$, $d^j_{HL}(n,m)$, $d^j_{HH}(n,m)$ 表示二维信号 $f(x,y)$ 在尺度函数 $\phi^{LL}_{j,n,m}(x,y) = \phi^{\text{fram}}_{j,n}(x)\phi^{\text{fram}}_{j,m}(y)$ 及小波函数 $\tilde{\psi}^{LH}_{j,n,m}(x,y) = \phi^{\text{fram}}_{j,n}(x)\tilde{\psi}^{\text{fram}}_{j,m}(y)$, $\tilde{\psi}^{HL}_{j,n,m}(x,y) = \tilde{\psi}^{\text{fram}}_{j,n}(x)\phi^{\text{fram}}_{j,m}(y)$, $\tilde{\psi}^{HH}_{j,n,m}(x,y) = \tilde{\psi}^{\text{fram}}_{j,n}(x)\tilde{\psi}^{\text{fram}}_{j,m}(y)$ 上的投影分量,分别反映了 $f(x,y)$ 在 j 尺度下的低频信息和水平、垂直、对角方向的细节信息,文献[3~5]有关于信号的基于双正交小波的小波标架表示理论及相关算法.

2.2 信号的正则性描述

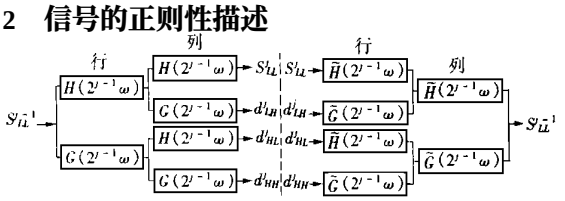


图 1 2D 信号基于小波标架的分解与重构算法

函数的正则性可用它的局部 Lipschitz 指数来描述,小波函数所具有的时频局部化特性为函数的局部 Lipschitz 指数估计提供了极好的工具. 定义小波函数 $\psi(x)$ 的支集 $\text{Supp}(\psi) = \{x \mid \psi(x) \neq 0\}$,及对某一固定点 x_0,定义 $S_j(x_0, \varepsilon) = \{l \in \mathbf{Z} \mid \text{Supp}(\psi^{\text{fram}}_{j,l}) \cap (x_0 - \varepsilon, x_0 + \varepsilon) \neq \varnothing\}$,则有定理 1.

定理 1 设 ψ 有 N 阶消失矩, $N > \alpha + 1$, $\int \psi(x) \mid \mathrm{d}x$ 及 $\int x^{\alpha}\psi(x) \mid \mathrm{d}x$ 存在. 如果对某 $\varepsilon > 0$,

$$\max_{l \in S_j(x_0,\varepsilon)} d^{\text{fram}}_j(l) = \max_{l \in S_j(x_0,\varepsilon)} \langle f, \psi^{\text{fram}}_{j,l} \rangle = O(2^{j\alpha}) \tag{2}$$

那么, f 在 x_0 点具有局部 Lipschitz 指数 α[5,6].

由该定理可知,函数的局部 Lipschitz 指数能够从它在此点附近的小波系数的跨尺度变化(特别是小波系数的模极大)来近似地估计.

2.3 白噪声在小波变换下的特征

设 $n(x,y)$ 为宽平稳、零均值白噪声过程,方差为 σ^2, $\psi(x,y)$ 为二维小波函数, $\psi_j(x,y)$ 表示 j 尺度某一方向的小波, $W_j n(x,y)$ 表示 $n(x,y)$ 的 j 尺度小波系数,那么有

$$E \mid W_j n(x,y) \mid^2 = \frac{\sigma^2 \parallel \psi \parallel^2}{2^{2j}} \tag{3}$$

3 干涉图像的小波变换降噪算法

根据信号的多分辨率表示, $S^J_{LL}(n,m)$ 表示信号的低频成分,反映的是信号的平稳(严格来说是与尺度有关的局部平稳)信息,而小波系数所含的是信号各尺度下的非平稳信息和噪声干扰的主要部分. 对于一般的信号来说,在信号的多分辨率表示中,信号的能量主要集中在低频系数 $S^J_{LL}(n,m)$ 中,而各层小波系数仅含信号能量的很小一部分,并且随尺度增加各层小波系数的信号能量成分增大,而噪声的能量减小. 根据干涉 SAR 噪声模型的特点及干涉相位处理过程的要求,构造了如下降噪算法(记 $LL = 0$, $LH = 1$, $HL = 2$, $HH = 3$, M 表示图像总像素的数目):

1) 对干涉图像进行小波变换,得到各尺度、各方向小波系数 $\{d^j_i \mid j = 1, \cdots, J; i = 1, 2, 3\}$ 和最粗尺度的尺度系数 $\{S^J_0\}$ (J 一般取 5);

2) 以 $j = 1$ 时各个方向的小波系数的方差作为噪声方差的估计 $\sigma^2_i(1)$ ($i = 1, 2, 3$) (由于实际数据的噪声干扰强度未知,按函数的正则性理论,反

映信号变化部分的小波系数按尺度 j 增加而增加,在 $j=1$ 时一般较小),选取各方向预处理门限 $t_i(1)=\sigma_i(1)$ ($i=1,2,3$) (选择这个门限是为了使有用的信号突变信息尽可能得到保留,同时去掉大部分噪声干扰);

3) 按(3)式确定 $j>1$ 时各尺度小波系数中噪声方差 $\sigma_i^2(j)$ ($i=1,2,3$),选取 $j>1$ 时各方向的预处理门限 $t_i(j)=\sigma_i^2(j)$ ($i=1,2,3$);

4) 根据 2),3) 确定的门限,对$\{d_i^j \mid j=1,\cdots,J;\ i=1,2,3\}$进行预处理:

$$\overline{d}_i^j(n,m)=\begin{cases} d_i^j(n,m) & |d_i^j(n,m)|>t_i(j) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

5) 根据 $j=2,3$ 的小波系数确定各个方向的约束支撑面 $\mathrm{Supp}_i(n,m)$ ($i=1,2,3$):

$$\mathrm{Supp}_i(n,m)=\begin{cases} 1 & |d_i^2(n,m)|\geq t_i(2)\ \text{或}\ |d_i^3(n,m)|\geq t_i(3) \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

6) 对于各方向约束支撑面 $\mathrm{Supp}_i(n,m)=1$ 的点 (n,m),计算相应的 Lipschitz 指数 $\mathrm{Lip}_i(n,m)$:

$$\mathrm{Lip}_i(n,m)=\frac{1}{J-2}\sum_{j=2}^{J-1}\frac{d_i^{j+1}(n,m)}{d_i^j(n,m)}$$

7) 根据能量控制函数

$$p_i(t)=\sum_{\{(n,m)\mid \mathrm{Lip}_i(n,m)\leq t\}}|d_i^2(n,m)|^2+\sum_{\{(n,m)\mid \mathrm{Supp}_i(n,m)=0\}}|d_i^2(n,m)|^2$$

考虑噪声的小波系数模极大的密度[6],取 T_i 为使 $p_i(t)\leq(M+9)\sigma_i^2(2)/4$ 成立的最大 t;

8) 对 4) 得到$\{\overline{d}_i^j(n,m)\mid j=1,\cdots,J;\ i=1,2,3\}$进行再处理,保留 $j\geq 3$ 对应的$\{\overline{d}_i^j(n,m)\mid i=1,2,3\}$不变($j\geq 3$ 时小波系数所含噪声已很少,且幅度也已降到很小),得新的$\{\widetilde{d}_i^j(n,m)=\overline{d}_i^j(n,m)\mid j\geq 3;\ i=1,2,3\}$,对于 $j=1,2,3$ 作如下修改:

$$\widetilde{d}_i^j(n,m)=\begin{cases} d_i^{j+1}(n,m)/\mathrm{Lip}_i(n,m) & \mathrm{Lip}_i(n,m)\geq T_i \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

9) 由$\{\widetilde{d}_i^j(n,m)\}$及$\{S_0^J(n,m)\}$逆小波变换,得到降噪后的干涉 SAR 图像.

从上述算法可以看出,本文给出的应用小波变换的干涉合成孔径雷达图像的降噪算法是基于观测数据的自适应算法,避免了低通滤波器所面临的选择窗口大小问题,基本思想是:首先设置预处理门限进行预处理,去掉大部分噪声而不失去有用信息,预处理门限是基于数据的噪声方差估计;然后在预处理后的数据上基于 Lipschitz 指数理论,对预处理后的数据进行再处理,预处理后的数据使得 Lipschitz 指数的计算更精确和避免了计算很大概率上是由噪声引起的跳变部位的 Lipschitz 指数,算法中由能量控制函数来选取 Lipschitz 指数的门限值,作为区分信号与噪声的分界线,它是完全基于数据的,而不是预先根据先验知识估计信号的 Lipschitz 指数,能较好地控制滤波后的数据不过于光滑或欠光滑.

4　实际数据的处理

本文所采用的数据是 1994 年 10 月获得的意大利 Etna 火山地区的 SIR-C/X-SAR 的 X-SAR 数据. 2 幅 X-SAR 图像经过对准后已获得干涉图像,选择干涉图像中的一部分作为测试区域. 测试区域的大小为 1024 ×1024 像素点. 箱形滤波器及中值滤波器的窗长的选择根据文献[7]中的计算的最佳结果来决定的.

图 2 显示实际数据经不同方法处理后某一距离向的结果. 从图中可以看出,经各种方法处理后,图像的噪声明显减小,对比 3 种方法的处理结果可以看出,经小波变换方法处理后的曲线的光滑性明显地比箱形滤波器处理的结果好. 同时,小波变换方法处理的结果与箱形滤波器的结果有明显的相似性,在它们不相同的某些局部位置,小波变换方法处理的结果又与中值滤波方法处理的结

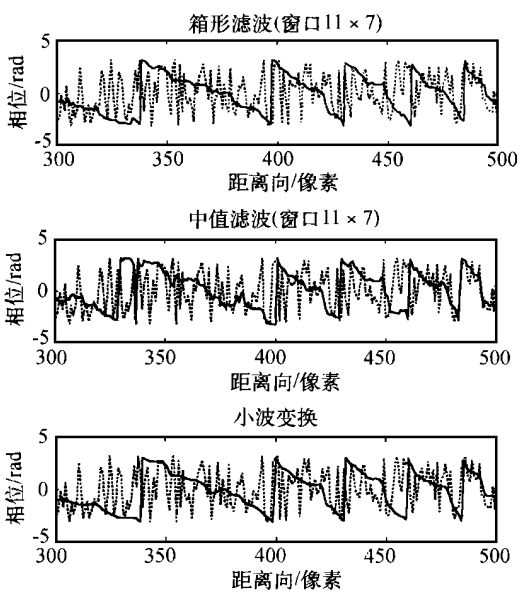
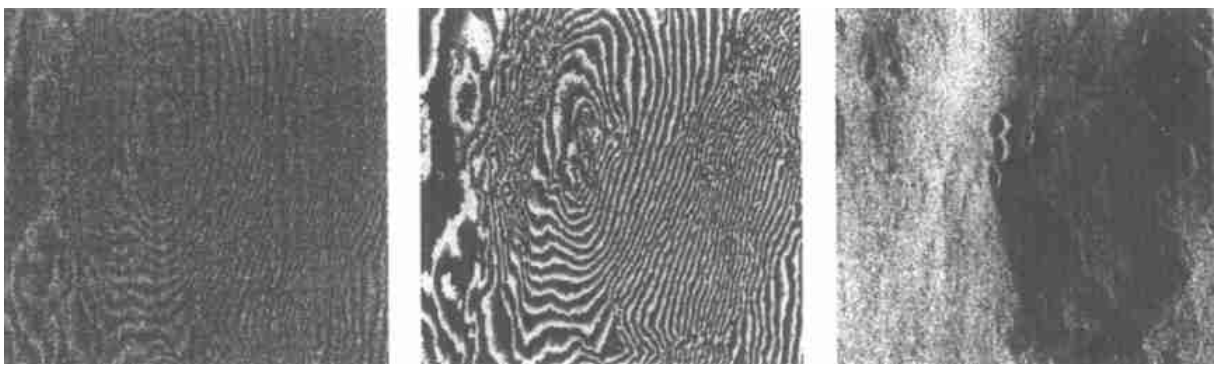


图 2　不同滤波器处理后的干涉相位剖面图
(图中虚线为未处理曲线,实线为滤波后曲线)

果类似.由此可见,小波变换方法可以较好地抑制干涉合成孔径雷达图像中的噪声,提高干涉相位的精度.

对于测试区的处理结果如图 3 所示.图 3a,图 3c 分别是原始的干涉相位图像和幅度图像,图 3b 是经小波变换处理后的干涉相位图像.对比图 3a 和图 3b 可知,处理后的相位图像的干涉条纹的清晰度得到很大的改善,从图 3c 反射强度图像可以看出,图 3b 的干涉条纹与实际地形高度的变化趋势基本相符.



a 原始干涉 SAR 的相位图　　b 小波变换降噪后的干涉相位图　　c 测试地区 SAR 反射强度图像

图 3　测试区图像处理结果

5 结　论

噪声的存在严重地影响着干涉 SAR 相位图像的质量,抑制噪声的干扰是干涉 SAR 处理过程中的必要步骤.具有对称性和紧支性的双正交小波变换的小波标架算法用于干涉 SAR 图像的处理的结果表明该方法可以有效地提高干涉相位精度,并且小波变换方法是基于观测数据的自适应算法,可以避免传统低通滤波方法选择窗长的问题,具有更广泛的应用前景.

参 考 文 献

1 Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. Radio Science, 1988, 23(4): 713～720

2 Lin Q, Vesecky J F, Zebker H A. New approach in interferometric SAR data processing. IEEE transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(3): 560～567

3 Cohen A I, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets. Commun Pure Appl Math, 1992, 45(5): 485～560

4 Strickland R N, Hahn H I. Wavelet transform methods for object detection and recovery. IEEE Trans on Image Proc, 1997, 6(5): 724～735

5 Daubechies I. Ten lectures on wavelets. Philadelphia: SIAM, 1992

6 Mallet S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets. IEEE Trans on Inform Theory, 1992, 38(2): 617～643

7 胡庆东,毛士艺. 干涉 SAR 图像水平地形效应的消除及降噪方法. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(4): 402～405

Wavelet Transform-Based Approach for Interferometric SAR Image Noise Reduction

Yuan Yunneng　Hu Qingdong　Mao Shiyi

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Electronic Engineering)

Abstract　Thermal and "Speckle" noise is an obstacle to obtain high accuracy phase in interferometric SAR images. According to the main sources of noise in interferogram, the noise character and the characteristics of interferometric SAR processing, biorthogonal wavelet transform with symmetry and compact support is introduced into the reduction of noise in interferometric SAR images. Based on the wavelet frame representation, a new algorithm for noise suppression in interferogram is proposed. Compared with the traditional low pass filter and median filter, it is showed that applying wavelet transform to the noise reduction in interferometric SAR images is promising. Furthermore, wavelet-transform-denoise is also the adaptive algorithm based on the observation data.

Key words　synthetic aperture radar; noise reduction; noise suppression; wavelet; wavelet frame