小波模拟退火-软阈值 SAR 图像降噪算法

周荫清 张 磊 徐华平

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 提出了一种新的 SAR(Synthetic Aperture Radar)图像降噪方法,利用小波变换对空间位置信息保留的特性,依据小波变换后近似图像仍满足吉布斯分布,将模拟退火算法引入到小波域中,首先,根据 SAR 功率图像斑点的特性,对传统的同态变换方法做出了相应的修正,大大降低了处理结果的辐射偏差,提高了等效视数,然后在多分辨率理论和小波变换理论基础上,选用适合特定图像的最优小波基进行分解,最后对小波变换后的近似图像进行模拟退火处理,对各个细节图像有选择地进行软阈值处理. 实验证明,此方法比传统的小波降斑取得了更好的平滑效果,比传统模拟退火大大减少了处理的时间,同时对图像的辐射精度的保持,斑点的抑制,以及边缘保持都有较满意的结果.

关 键 词: 合成孔径雷达; 斑点; 小波变换; 模拟退火

中图分类号: TN 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)03-0293-04

Combined simulated annealing and soft-threshold wavelet de-noising of SAR image

Zhou Yinqing Zhang Lei Xu Huaping

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A technique of speckle reduction in synthetic aperture radar (SAR) images was presented. Based on the character of wavelet transforms that the approximate coefficients of the transformed image still obey Gibbs distribution, the simulated annealing to the wavelet domain was introduced. The traditional logarithmic transformation was modified to adapt the power SAR images, which can maintain the mean of the SAR image better and achieve a better equivalent-look, then based on multi-resolution analysis theory and wavelet transform theory, an optimal mother wavelet was found to match the specific images. The algorithm of simulated annealing was applied to the coefficient in the scaling subspace and the algorithm of soft-thresholding was applied to the coefficient in the wavelet subspace distinctively. The result of experiments show that the new technique achieves a better smooth result when compared to the traditional wavelet denoising, at the same time it saves much time when compared to the simulated annealing, and it improves the structure and edge preservation with satisfying denoising results.

Key words: synthetic aperture radar; speckle; wavelet transforms; simulated annealing

合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar)是一种具有全天时,全天候工作优点的高分辨率微波成像雷达,被广泛应用于军事和民用领域. 由于 SAR 的相干成像特点,造成图像不可避免的含有斑点噪声,这大大降低了 SAR 图像的质量,并对 SAR 图像的可释性以及后期的分割,分类,编码等带来困难.

到目前为止,已经有大量的斑点抑制方法. 早期的多视处理技术;随着数字图像技术发展而出现的各种空域滤波算法[1,2];基于小波变换的

收稿日期: 2005-06-17

作者简介: 周荫清(1936-),男,湖南湘潭人,教授,buaazyq@263.net.

SAR图像降斑处理方法[3~5];模拟退火算法也是斑点抑制的途径之一[6].

本文提出基于小波变换的模拟退火-软阈值算法,它将小波域滤波与模拟退火相结合,在多分辨率分析的基础上,利用紧支撑小波做小波变换,将图像的能量最大限度的投射到下一级分辨率的近似图像中,采用模拟退火对近似图像进行处理,同时采用软阈值对细节图像进行处理,这样不但大大缩短了模拟退火处理的时间,充分利用了模拟退火较好的平滑作用,而且减少了小波细节图像处理中对边缘和噪声之间的误判,更好地利用了小波变换处理方法保持边缘较好的特点.

1 模拟退火-软阈值方法

White提出的模拟退火算法[6]存在两大缺点:①由于模拟退火算法本身的复杂以及迭代的计算使该算法的处理时间过长;②对边缘的保持仍有待提高;小波软阈值算法[3,5,7,8]也存在2个缺点:①软阈值处理需要从图像的细节高频信息中区分出斑点噪声,这就决定小波软阈值算法对细节保持较好是以牺牲部分斑点抑制作为代价的;②为了符合斑点抑制的指标往往不得不进行过多级小波变换,将造成所谓的小波高频系数实际对应频域频率已经较低,软阈值处理可能会造成图像目标的丢失.

本文提出的小波域的模拟退火-软阈值算法主要包括:同态变换,小波基选择,小波正变换,模拟退火-软阈值处理,小波反变换以及指数变换6个步骤:

1) 同态变换:基于SAR图像的乘性斑点模型和小波域祛噪的要求[4],首先需要对图像做同态变换.

2) 最优小波基选择:必须让图像的大部分能量投影到下一级分辨率的近似图像中去,所以,需要为待处理图像选择最佳小波母函数.

3) 小波正变换:利用步骤2中得到的小波基对图像进行j级小波变换.

4) 模拟退火-软阈值处理:本文采用文献[9]中的改进模拟退火算法进行滤波处理,同时对各级细节小波系数分别做软阈值抑制处理.

5) 小波反变换:对做完滤波处理的图像利用步骤2中的小波基进行j级小波反变换.

6) 指数变换:对5)中得到的图像做指数变换,得到降斑图像.

新算法与单独模拟退火和小波软阈值相比具有3大优势:①减低了模拟退火的迭代次数的要求;②模拟退火存在边缘保持差的缺点在此一样地被避免③由于最优小波基的选择,这就减轻了软阈值判断图像细节和噪声之间的压力.

2 小波预处理同态变换的修正

对于SAR斑点噪声来说,一般被认为是乘性模型:

$$Y(r,a)=\mu_Y T(r,a)\cdot S(r,a) \tag{1}$$

式中,(r,a)为图像的距离向和方位向的坐标;μ_Y为平均强度;T为真实目标的强度;S为斑点噪声的强度;其中T和S相互独立,均值都为1,方差分别为

$$\sigma_s^2=1 \tag{2}$$

$$\sigma_T^2=[(\sigma_Y/\mu_Y)^2-1/L]/(1+1/L) \tag{3}$$

式中,σ_Y表示污染图像的均方差;L表示图像的视数.

小波域处理方法要图像的噪声模型为加性[4],常用的方法[7,8]:

$$\tilde{y}=\ln(|Y|+1) \tag{4}$$

其中1的引入必将带来模型转换的误差.

考虑将传统的加1修正为$\mu_Y T$:

$$\tilde{y}=\ln(|Y|+|\mu_Y T|)=\ln(|S|+1)+\ln(|\mu_Y T|) \tag{5}$$

由式(5)可以看出乘性噪声很好地被转换成加性模型,如果$\mu_Y T$的均值远远大于它的方差,就可以用随机变量的均值来近似地表示该随机变量,考虑原图的分布方差[2],有

$$\sigma_s\approx\sigma_Y/\mu_Y \tag{6}$$

对于单视图像($L=1$),结合式(2)、式(3)、式(6)有:

$$\sigma_T^2=[(\sigma_Y/\mu_Y)^2-1/L]/(1+1/L)\approx 0$$

于是式(5)为

$$\tilde{y}=\ln(|Y|+\mu_Y)\approx\ln(|Y|+|\mu_Y T|)=\ln(|S|+1)+\ln(|\mu_Y T|) \tag{7}$$

3 最优小波基的选择

离散小波变换理论(DWT)以及其在多分辨率分析(MRA)中的应用在近年来已经被很深入地研究了[10~12],设$x(t)\in L^2(R)$,V_j定义为$L^2(R)$的一系列子空间,W_j定义为V_j在V_{j-1}下的正交补空间,推广即可得到多分辨率分析的子空间关系如式(8)所示:

$$L^2(R)=V_i\oplus W_i\oplus W_{i-1}\oplus W_{i-2}\oplus\cdots\oplus W_1 \tag{8}$$

式(9)、式(10)给出V_j和W_j的标准正交基:

$$\varphi_{jk}=2^{-j/2}\varphi(2^{-j}t-k) \tag{9}$$

$$\psi_{jk} = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - k) \tag{10}$$

式中,φ_{jk}就是各个分辨率下的尺度函数,具有低通特性;而 ψ_{jk}就是各个分辨率下的小波母函数.

经过小波变换后的信号如果按照频域来划分,如图 1 所示.

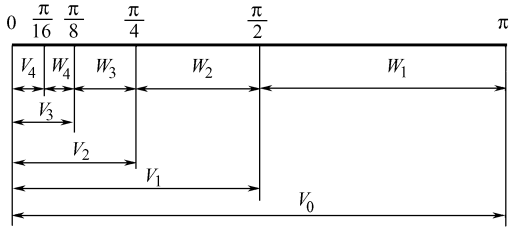


图 1　小波变换后对应频域范围

信号在各个分辨率下的近似分量和细节分量定义为

$$\left.\begin{aligned} c_k^j &= < x_{j-1}(t), \varphi_{jk} > \\ d_k^j &= < x_{j-1}(t), \psi_{jk} > \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

其中<…,…>为 L^2 的内积,推广到二维情况:

$$\left.\begin{aligned} A_j &= < x_{j-1}(m,n), \varphi(m)\varphi(n) > \\ H_j &= < x_{j-1}(m,n), \varphi(m)\psi(n) > \\ V_j &= < x_{j-1}(m,n), \psi(m)\varphi(n) > \\ D_j &= < x_{j-1}(m,n), \psi(m)\psi(n) > \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

式中,A_j 为各个分辨率下的近似图像;H_j, V_j, D_j 分别为各个分辨率下的细节图像.

设

$$x(t_1,t_2) = \sum_{k_1}\sum_{k_2} x(m,n)\varphi(t_1 - k_1, t_2 - k_2) \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(t_1,t_2) = &\sum_{k_1}\sum_{k_2} H_1(k_1,k_2)\frac{1}{\sqrt{2}}\psi^{\mathrm{H}}(t_1/2 - k_1, t_2/2 - k_2) + \\ &\sum_{k_1}\sum_{k_2} V_1(k_1,k_2)\frac{1}{\sqrt{2}}\psi^{\mathrm{V}}(t_1/2 - k_1, t_2/2 - k_2) + \\ &\sum_{k_1}\sum_{k_2} D_1(k_1,k_2)\frac{1}{\sqrt{2}}\psi^{\mathrm{D}}(t_1/2 - k_1, t_2/2 - k_2) \end{aligned} \tag{14}$$

式中,$x(t_1,t_2)$为原图像;$x(m,n)$为 0 尺度下的 $x(t_1,t_2)$的近似,即最高分辨率下的 $x(t_1,t_2)$;$\hat{x}(t_1,t_2)$为 1 级小波变换的细节重构图像;$x(t_1,t_2)$和 $\hat{x}(t_1,t_2)$之间的误差能量为

$$\begin{aligned} E &= \iint e^2(t_1,t_2)\,\mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2 = \\ &\iint (x(t_1,t_2) - \hat{x}(t_1,t_2))^2\,\mathrm{d}t_1\mathrm{d}t_2 \end{aligned} \tag{15}$$

为了使能量尽可能的投射到近似分量上,就要求 $\hat{x}(t_1,t_2)$较小,就应该选择小波使式(15)中 E 值取到最大.

表 1 给出了对一幅真实的单视 SAR 图像各种小波带来的 E 大小的比较.

表 1　各类小波映射到下一级能量的偏差比较

参数	小波种类							
	Haar	Db2	Db4	Db8	Sym2	Sym4	Sym8	Coif5
$E/10^{10}$	1.542	1.561 8	1.572 4	1.577 3	1.561 8	1.572 1	1.577 3	1.578 7

4　实验结果及分析

用本文提出的方法对一幅真实的单视 SAR 功率图像(1 024×1 024)做处理,并详细给出处理结果以及各种算法之间的比较.

降斑效果如表 2 所示,其中 $\mu, \Delta, \eta, \gamma, M_{\mathrm{ENL}}, t$ 分别代表 SAR 功率图像的均值、辐射偏差,边缘保持系数,辐射分辨率,等效视数和处理时间.

辐射偏差的定义如式(16)所示:

$$\Delta = (\mu_{\mathrm{R}} - \mu_{\mathrm{I}})/\mu_{\mathrm{I}} \times 100\% \tag{16}$$

边缘保持系数定义如式(17)所示:

$$\eta = \left(\sum_{m=1}^{M} \hat{R}_{m\mathrm{H}} \Big/ \hat{R}_{m\mathrm{L}}\right) \Big/ \sum_{m=1}^{M} I_{m\mathrm{H}}/I_{m\mathrm{L}} \tag{17}$$

式中,$\hat{R}_{m\mathrm{H}}, \hat{R}_{m\mathrm{L}}$分别表示处理后图像边缘处功率较高和较低一侧的像素点的功率值;$I_{m\mathrm{H}}, I_{m\mathrm{L}}$表示原图像边缘处功率较高和较低一侧的像素点的功率值;η 值越大,表示斑点抑制后边缘的对比度越大,边缘保持越好.

辐射分辨率和等效视数定义如式(18)、式(19)所示:

$$\gamma = 10\log(1/\sqrt{M_{\mathrm{ENL}}} + 1)\,t \tag{18}$$

$$M_{\mathrm{ENL}} = \mu^2/\sigma^2 \tag{19}$$

等效视数的数值越大或辐射分辨率的数值越小,说明斑点平滑效果越好.

表 2 结果显示,本文提出的结合方法更好地保持了边缘细节,并有效地去除了噪声.

表 2　各种算法单独处理与改进算法处理结果比较

方法	小波变换级数 j	同态变换修正	μ	Δ/%	η	γ/dB	M_{ENL}	t/s	模拟退火迭代次数
原图像			7 612.52	0	1	3.01	1.00		
小波软阈值（Db8 小波）	1	1	7 569.91	−0.55	1.216 7	3.19	0.85	5	
		μ_Y	7 570.47	−1.87	1.047 3	2.57	1.54		
	2	1	6 809.94	−10.54	1.181 5	2.79	1.23	6	
		μ_Y	7 194.64	−5.49	1.347 6	2.25	2.16		
	3	1	6 136.39	−19.22	1.132 8	2.28	2.09	7	
		μ_Y	6 991.25	−8.16	1.435 0	1.94	3.13		
模拟退火			7 421.36	−2.51	1.030 2	2.14	2.48	628	5
模拟退火-软阈值（Db8 小波）	1	1	5 841.19	−23.18	1.261 9	1.89	3.35	168	5
		μ_Y	6 891.15	−9.48	1.248 2	1.81	3.73		
	2	1	5 562.59	−26.93	1.289 7	1.58	5.20	52	5
		μ_Y	6 836.84	−10.19	1.441 2	1.56	5.39		
模拟退火-软阈值（Coif5 小波）	1	1	5 853.33	−23.11	1.221 2	1.89	3.46	181	5
		μ_Y	6 888.12	−9.52	1.229 8	1.81	3.74		
	2	1	5 566.22	−26.88	1.387 8	1.58	5.14	49	5
		μ_Y	6 827.62	−10.31	1.483 5	1.55	5.41		

5 结 论

根据多分辨率分析理论和小波变换理论，图像的能量可以很大程度地投射到近似图像上，本文提出小波域上的模拟退火-软阈值方法来降噪，在对传统同态变换修正的基础上，处理结果和传统同态变换相比，降低了辐射偏差；通过选择最优小波，对小波变换后的近似分量进行模拟退火处理，根据图像细节系数在频域上对应的分布特点，可以对各级细节分量有选择地进行软阈值处理，新方法不但更好地保持了图像的细节和边缘，而且处理的时间比模拟退火也有了很大的缩减，可以更好地保持图像的空间分辨率，得到更好的降斑效果，但是需要指出的是，由于小波变换中同态变换的引入，文中提出的方法对图像还是会带来一定的辐射偏差，需要进一步改进.

参考文献（**References**）

[1] Lee J S. Simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1983, 13(1): 85 ~ 89

[2] 李春升. 高分辨率星载 SAR 单视图像斑点噪声抑制实现方法[J]. 电子学报,2000, 28(3): 13 ~ 16
Li Chunsheng. Speckle reduction for high resolution one-look spaceborne SAR images[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 13 ~ 16(in Chinese)

[3] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613 ~ 627

[4] Guo H, Odegard J E, Lang M, *et al*. Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R[J]. IEEE International Conference on Image Processing, 1994, 1: 75 ~ 79

[5] Sveinsson J R, Hranfnkelsson A M, Benediktsson J A. Multiple wavelet transforms for speckle reduction of SAR images[A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (Vol. 2)[C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1999. 1321 ~ 1324

[6] White R G. Cross-section estimation by simulated annealing [A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (Vol. 4)[C]. Piscataway: IEEE, 1994. 2188 ~ 2190

[7] Sveinsson J R, Benediktsson J A. Speckle reduction and enhancement of SAR images in the wavelet domain[A]. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (Vol. 1)[C]. Piscataway: IEEE, 1996. 63 ~ 66

[8] Zhang Jun, Cheng Xueguang, Liu Jian. Speckle reduction algorithm by soft-thresholding based on wavelet filters for SAR images [A]. International Conference on Signal Processing Proceedings, ICSP(Vol. 2)[C]. Piscataway: IEEE, 1998. 1469 ~ 1472

[9] 燕 英,周荫清. 模拟退火法在 SAR 单视图像中斑点噪声抑制中的应用研究[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1903 ~ 1907
Yan Yin, Zhou Yinqing. Speckle removal for SAR single-look image by simulated annealing[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1903 ~ 1907(in Chinese)

[10] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Philadelphia: SIAM, 1992

[11] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[EB/OL]. http://www.qiji.cn/eprint/abs/1592.html, 2004-10-04

[12] Mallat S G. Theory for multiresolution signal decompositon: the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674 ~ 693

[13] Chapa J O, Rao R M. Algorithm for designing wavelets to match a specified signal[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(12): 3395 ~ 3406

[14] Patuck N, McLernon D. Optimization of orthogonal wavelets for image compression[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing(Vol. 3)[C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004. 653 ~ 656