

基于双密度双树复数小波变换的合成孔径雷达图像降噪研究

郭 巍^{1,2}, 张 平¹, 陈 曦^{1,2}, 朱 良^{1,2}

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 针对合成孔径雷达 (SAR) 图像相干斑噪声抑制问题, 本文将双密度双树复数小波变换 (DD-DT CWT) 结合具有局部方差估计的双变量收缩阈值函数 (BSF) 构成一种新的 SAR 图像降噪算法实现合成孔径雷达图像降噪. 首先将 SAR 图像用双密度双树复数小波变换进行多尺度分解, 考虑小波系数间的相关性, 用双变量概率密度函数作为小波系数及其父代系数的统计相关性的模型, 并通过 Bayesian 估计理论导出相应的非线性双变量收缩函数对图像不同方向的小波系数进行非线性自适应的处理, 最后重建降噪后的图像. 分别用仿真 SAR 图像和实际图像对算法进行验证, 并与其它方法的性能进行比较, 对不同算法处理后图像进行了主客观评价, 分析结果表明, 新算法的去噪效果明显优于传统的小波变换方法, 不仅有效实现了图像降噪, 而且较好保留了图像细节. 含噪 SAR 图像经该算法处理后, 图像性能指标均有提高.

关键词: 合成孔径雷达图像; 双密度双树复数小波变换; 相干斑噪声抑制

中图分类号: TP753 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 12-2747-06

Research on Synthetic Aperture Radar Image Denoising with Double Density Dual-Tree Complex Wavelet Transform

GUO Wei^{1,2}, ZHANG Ping¹, CHEN Xi^{1,2}, ZHU Liang^{1,2}

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper presents an improved algorithm for suppressing the synthetic aperture radar image speckle noise, in which the double density dual tree complex wavelet transform (DD-DT CWT) was combined with the bivariate shrinkage function (BSF) with local variance estimation. The SAR image was firstly decomposed by the DD-DT CWT, the bivariate probability density function was used as statistic correlation model for wavelet coefficients and their parent, and the corresponding bivariate shrinkage function was obtained by Bayes estimation theory. Then the wavelet coefficients were shrunk by the BSF, in which different orientations were nonlinear processed adaptively, finally the denoised image was reconstructed by all the update coefficients. The algorithm presented was tested by simulated and actual SAR image, and compared with other methods. Results are presented to verify that, the new algorithm significantly outperforms the traditional wavelet-transform-based denoising algorithm, and effectively denoises the noisy image as well as preserves the particulars. The performance index of the denoised image were simultaneously improved.

Key words: synthetic aperture radar image; double density dual-tree complex wavelet transform; speckle noise suppression

1 引言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种高分辨率、主动式的二维相干成像雷达, 它以其高分辨率和全天候、全天时、大面积的数据获取能力而成为世界各国普遍重视的对地观测技术. 但 SAR 相干成像过程中固有的相干斑噪声严重影响了图像质量, 使得 SAR 图像不能正确反映地物目标的散射特性, 降低了对图像中目标的信息提取能力, 给后续分析带来困难. 因此, 抑制相干斑噪声, 是 SAR 图像应用的重要前提.

过去的研究中提出了许多基于合成孔径雷达斑点噪声统计特性的空域滤波算法, 在图像上取一个滑动窗口, 以窗口内所有像素作为滤波器的输入值, 基于其局部统计特性进行滤波处理, 典型的如 Lee 算法, Kuan 算法, Frost 算法等. 这类算法的性能主要依赖于滤波窗口大小和方向的选择, 在同质区域能有效抑制相干斑, 但在异质区域往往伴随着边缘模糊等缺点. 这些方法侧重的是 SAR 图像的降噪效果, 而对边缘和细节特征的保持则不够理想. 随着小波变换理论的广泛应用, 涌现出了大量新的基于离散小波的 SAR 图像小波阈值降噪方

法^[1]. 在实际应用中,小波变换的方法对边缘保持、图像细小结构的保持和恢复有着更好的效果. 但是这些非线性小波阈值降噪方法通常存在两个问题:首先是离散小波变换的不足之处,方向表示能力弱,不含有描述非平稳信号的相空间信息,且存在平移变异性和易产生混叠等缺陷^[2];其次这些方法均假设小波系数是独立的,而实际的小波系数却是统计相关的,忽略小波系数之间的关系,将使 SAR 图像降噪系统的性能降低.

针对合成孔径雷达图像相干斑抑制中的上述问题,本文在双密度双树小波变换(DD-DT DWT)^[3]的基础上,提出了一种新的基于双密度双树复数小波变换(Double-Density Dual-Tree Complex Wavelet Transform, DD-DT CWT)的合成孔径雷达图像去噪方法. 将双密度双树复数小波变换结合具有局部方差估计的双变量收缩阈值函数(Bivariate Shrinkage Function, BSF)构成的改进算法应用于合成孔径雷达图像降噪. 由于 DD-DT CWT 兼有双密度离散小波变换和双树离散小波变换的优点,具有平移不变性和抗混叠特性、更加近似连续小波变换和较强的方向选择性、空间间隔更紧凑等性质,对图像几何特征有更优的表达能力,更适合表示图像中具有方向的边缘特征,特别适合应用在图像分析与处理等领域. 具有局部方差估计的 BSF,考虑了小波系数间的相关性,不仅使降噪算法自适应并有效地平滑噪声,而且能较好地保留原始图像的细节特征. 对仿真 SAR 图像和实际 SAR 图像实验,并将结果与严格采样的离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)和双树复数小波变换(Dual Tree Complex Wavelet Transform, DT CWT)结合不同阈值函数的实验结果进行了比较,分析结果表明,经本文方法降噪后的合成孔径雷达图像,不仅平滑了噪声、较好的保留了图像的细节特征,而且各项性能指标均有不同改善. 该方法所取得的结果远优于现有的小波变换方法.

2 双密度双树复数小波变换

2.1 二维双密度双树小波变换原理

二维双密度双树小波采用了 3 个 Hilbert 滤波器对, h_0 为低通滤波器, h_1 为一阶高通滤波器, h_2 为二阶高通滤波器. 二维双密度双树小波变换有 2 个尺度, 4 个分辨函数, 即 $h_{i,i}(t)$, $g_{i,i}(t)$, $i = 1, 2$.

两个小波函数是将另一个函数偏置一半得到的, 即

$$h_{i,1}(t) \quad h_{i,2}(t - 0.5) \quad (1)$$

$$g_{i,1}(t) \quad g_{i,2}(t - 0.5) \quad (2)$$

另外两个小波函数是近似 Hilbert 变换对, 即

$$g_{i,1}(t) \quad H \left| h_{i,1}(t) \right| \quad (3)$$

$$g_{i,2}(t) \quad H \left| h_{i,2}(t) \right| \quad (4)$$

双密度双树小波变换每一层可得到 6 个方向因子, 文献^[3]给出了详细的详细设计过程, 其滤波器结构如图 1 所示.

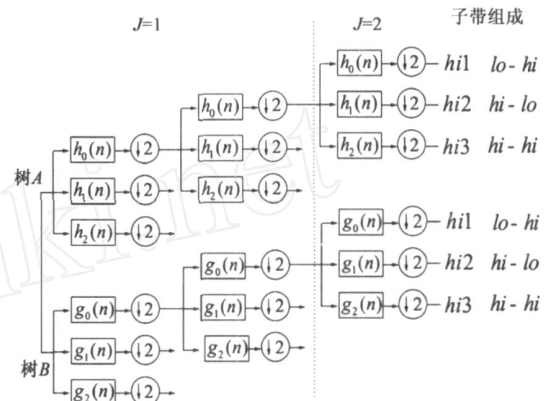


图1 双密度双树小波的滤波器结构

2.2 二维双密度双树复数小波变换原理

在同一个数据上, 可以用两个独立的小波变换平行作用来实现复数小波变换^[4], DD-DT CWT 可通过二组 3 对滤波器同时作用在输入数据上来实现. DD-DT DWT 每层仅对低频部分进行分解, 没有对高频部分进行再分解, 显然高频部分也包含许多有用的信息. 因此, 在对低通滤波器进行分解的同时, 对 2 个高通滤波器也进行进一步分解, 并通过将两棵树的系数进行组合, 用上部树 A 的迭代滤波器组表示复数小波变换的实部, 下部树 B 的迭代滤波器组表示复数小波变换的

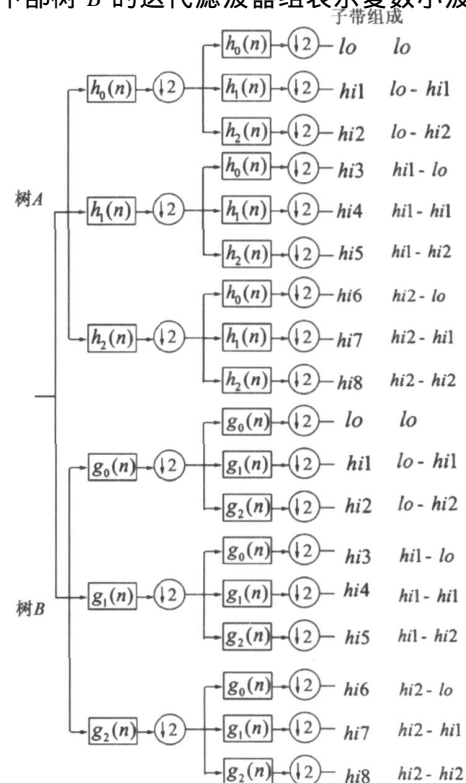


图2 双密度双树复数小波的滤波器结构

虚部,形成了双密度双树复数小波变换,即

$$j, k(x, y) = h(j, k)(x, y) + i g(j, k)(x, y), j, k = 0, 1, 2 \quad (5)$$

对应于 DD-DT CWT 的滤波器结构包含两个平行实现的过采样的迭代滤波带,如图 2 所示.从图 2 可以看出,每棵树有 9 个子带,其中 6 个子带 $hi1, hi2, hi3, hi5, hi6, hi7$ 具有方向性信息,因而每一层分解有 12 个不同方向的信息,且无论二维双密度双树复数小波变换分解树有多深,每层都保持 12 个方向的信息,比二维实数小波变换多了 6 个方向.因此可以进一步提高图像的分解与合成的精度,从而更好地提取原始图像的信息.

3 具有局部方差估计的双变量收缩函数

大多数小波去噪算法均假设系数是独立分布的,而实际的小波系数却是统计相关的,如果能够建立模型考虑这些系数间的相关性,可以提高去噪效果.已有研究表明,考虑到系数间相关性的算法比那些使用独立假设的算法得到的结果好^[5].可以用双变量概率密度函数作为小波系数及其父代系数的统计相关性的模型,并通过 Bayesian 估计理论导出相应的非线性双变量收缩函数^[6].实验和分析表明,由于该模型能够较好地体现小波系数间的相关性,且复杂度低,可以提高图像降噪算法的性能.本文将 DD-DT CWT 与具有局部方差估计的 BSF 相结合,给出一种 SAR 图像相干斑抑制算法.

根据 SAR 图像的性质^[7],SAR 图像中的相干斑是一种乘性噪声,SAR 图像模型可表示为:

$$I = F \cdot Z \quad (6)$$

其中, I 为带噪 SAR 图像的像素值(观测强度), F 为待恢复的无噪声图像的像素值(后向散射系数), Z 为乘性噪声, F 和 Z 相互独立.通过这个乘性噪声模型,可以把相干斑看作噪声,把观测强度看作是后向散射系数乘上噪声.虽然,本质上后向散射系数是一个确定的值,但它的大小是未知的,可以看作是一个随机变量.对式(6)进行对数变换,把乘性噪声转化为加性噪声.在小波域中,SAR 图像模型可表示为:

$$\tilde{y} = \tilde{x} + \tilde{n} \quad (7)$$

其中 \tilde{y} 表示含噪声图像小波系数, \tilde{x} 为不含噪声图像小波系数, \tilde{n} 为噪声.

设 x_{2k} 表示 x_{1k} 的父代系数, x_{2k} 表示与第 k 个小波系数 x_{1k} 在同一位置的临近粗尺度小波系数, y_{1k}, y_{2k} 分别表示 x_{1k}, x_{2k} 的观测值(含噪), n_{1k}, n_{2k} 表示噪声,有:

$$y_{1k} = x_{1k} + n_{1k}, y_{2k} = x_{2k} + n_{2k}$$

上式进一步用矩阵表示为:

$$y_k = x_k + n_k \quad (8)$$

其中, $x_k = (x_{1k}, x_{2k}), y_k = (y_{1k}, y_{2k}), n_k = (n_{1k}, n_{2k})$.至此,加入考虑了小波系数和其父代之间的相关性.(为简便,下述公式省略下标 k)

对小波系数 x 的标准最大后验(MAP)估计为:

$$\hat{x} = \arg \max_{x|y} p(x|y) \quad (9)$$

根据 Bayes 理论,最大后验估计器 MAP 可以用噪声的概率密度函数 p_n 和图像小波系数的概率密度函数 p_x 进行估计:

$$\begin{aligned} \hat{x}(y) &= \arg \max_x [p_{y|x}(y|x) \cdot p_x(x)] \\ &= \arg \max_x [p_n(y-x) \cdot p_x(x)] \end{aligned} \quad (10)$$

小波系数及其父代系数的非高斯双变量概率密度函数^[8]为:

$$p_x(x) = \frac{3}{2} \exp\left(-\sqrt{3} \sqrt{x_1^2 + x_2^2}\right) \quad (11)$$

其中 σ^2 为第 k 个小波系数边缘方差.由式(10)和式(11)可以得到 x_1 的最大后验概率估计,即双变量联合收缩函数为:

$$\hat{x}_1 = \frac{(\sqrt{y_1^2 + y_2^2} - T)_+}{\sqrt{y_1^2 + y_2^2}} \cdot y_1 \quad (12)$$

其中 $(\cdot)_+$ 定义为:

$$(\cdot)_+ = \begin{cases} 0, & \text{if } g < 0 \\ g, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

具有局部方差的阈值 T 的估计值为:

$$\hat{T} = \frac{\sqrt{3} \cdot \hat{\sigma}_n^2}{\hat{\sigma}_x^2} \quad (14)$$

为了得到 x_1 的估计,需要先求得噪声方差 σ_n^2 和小波系数观测值的局部边缘方差 σ_y^2 .定义第 k 个小波系数为中心的邻近局部矩形窗区域 $N(k)$, M 为矩形窗区域尺寸.然后使用此区域中的小波系数来估计此区域的小波系数边缘方差.首先对噪声方差的估计采用中值估计^[9],其估计值为:

$$\hat{\sigma}_n^2 = \frac{\text{median}(|y_i|)}{0.6745}, y_i \text{ subbandHH} \quad (15)$$

由观测模型得到 $\sigma_y^2 = \sigma_x^2 + \sigma_n^2$, σ_y^2 的经验估计^[8]为:

$$\hat{\sigma}_y^2 = \frac{1}{M} \sum_{y_i \in N(k)} y_i^2 \quad (16)$$

由此得到小波系数的边缘方差 σ^2 的估计为:

$$\hat{\sigma}^2 = \sqrt{(\hat{\sigma}_y^2 - \hat{\sigma}_n^2)_+} \quad (17)$$

需要特别说明的一点是由于 DD-DT CWT 具有平移不变性,可近似认为小波系数的奇异表现在相同位置,更符合小波系数层间相关性这个前提条件,因此,基于双变量收缩函数的局域自适应收缩算法将更适用于 DD-DT CWT 变换域.

4 基于 DD-DT CWT 的 SAR 图像去噪算法实现

基于双密度双树复数小波变换(DD-DT CWT) 结合局部方差估计的双变量收缩阈值函数(BSF) 的去噪算法实现合成孔径雷达图像降噪流程图如图3所示,其实现步骤如下:



图3 DD-DT CWT结合BSF的SAR图像相干斑去噪算法流程图

(1) 将合成孔径雷达图像进行对数转换,把图像中的乘性斑点噪声转化成为加性噪声.

(2) 对转换后的图像进行 DD-DT CWT 多尺度分解,得到每一层的不同细节方向上的小波系数.

(3) 分别根据式(15)和式(16)由每一层每一方向上的每个小波系数的邻近局部区域内的小波系数 y_1, y_2 , 估计边缘方差 σ_y^2 、噪声方差 σ_n^2 的值. 然后根据式(17)计算相应的小波系数边缘方差 σ^2 的估计值.

(4) 根据式(14)计算每一层每一细节方向上小波系数阈值的估计值.

(5) 按式(12)对小波系数进行阈值收缩处理,逐层处理直至所有分解层的所有细节方向上的小波系数处理完毕.

(6) 用处理后的小波系数重建降噪后的对数值 SAR 图像,将其进行反对数变换,最终输出得到降噪后的图像.

5 仿真与结果分析

为了验证本文算法的有效性,分别对仿真 SAR 图像和实际 SAR 图像进行实验,并将本文结果与 DWT、DT CWT 小波算法结合不同阈值函数构成的算法的降噪结果进行比较,并对降噪后的 SAR 图像进行定量分析. 本文除选取了峰值信噪比(Peak signal-to-noise ratio, PSNR)和信号均方误差比(Signal-mean-square error ratio, S/MSE),还引入去斑质量评估参数辐射分辨率(Radiometric Resolution, RR)和相关度(Correlation ratio, CR)对 SAR 图像相干斑抑制算法进行定量评价. 各参数定义分别为:

定义 $r(i, j)$ 为原始图像在坐标 (i, j) 上的灰度值, $\hat{r}(i, j)$ 为降噪后恢复图像在 (i, j) 上的重建值, M, N 分别为图像方位向和距离向的像素个数,峰值信噪比定义为:

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{s_{\max}}{MSE} \right) \quad (18)$$

其中 s_{\max} 为峰值信号的功率, $s = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N r(i, j)^2$ 为输入图像信号功率, MSE 为均方误差, $MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [r(i, j) - \hat{r}(i, j)]^2$.

信号与均方误差之比 S/MSE 定义为:

$$S/MSE = 10 \lg \frac{R^2}{\sum_{pixels} (R - \hat{R})^2} \quad (19)$$

其中, R 是含噪图像, \hat{R} 是含噪图像的滤波结果.

辐射分辨率表示从图像中区分相邻分布目标的能力,反映了 SAR 系统相干斑噪声抑制的程度,可以按下式计算一幅图像的辐射分辨率:

$$RR = 10 \lg \left(1 + \frac{\mu}{\sigma} \right) \quad (20)$$

其中, μ 和 σ 分别为图像数据的均值和标准差.

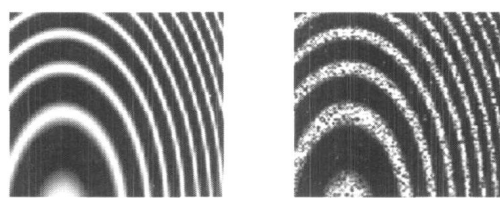
相关度是用来评价 SAR 图像相干斑噪声抑制后保留边缘细节的程度,其定义为:

$$CR = \frac{(\overline{R - \hat{R}_1}, \overline{R - \hat{R}_2}, \overline{\hat{R}_1 - \hat{R}_2})}{\sqrt{(\overline{R - \hat{R}_1}, \overline{R - \hat{R}_2}) \cdot (\overline{R - \hat{R}_1}, \overline{R - \hat{R}_2})}} \quad (21)$$

其中, $(\overline{R - \hat{R}_1}, \overline{R - \hat{R}_2}) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K R_1 \cdot R_2$. \overline{R} 和 $\overline{\hat{R}}$ 是 R 和 \hat{R} 通过 3×3 像素的标准 Laplacian 算子的高通滤波结果, \overline{R} 和 $\overline{\hat{R}}$ 分别是 R 和 \hat{R} 的均值, CR 越大,保留边缘细节效果越好.

5.1 仿真 SAR 图像实验

根据合成孔径雷达成像原理和目标回波信号数学模型^[10],仿真无噪声 SAR 图像. 用均值为 0、方差为 0.4 的 Gauss 分布乘性噪声模拟 SAR 图像中的相干斑噪声,作用于仿真的无噪声 SAR 图像. 仿真的无斑点噪声和含斑点噪声的 SAR 图像分别如图 4(a)、(b) 所示.



(a) 无噪声 (b) 含噪声
图4 仿真SAR图像

分别采用 DWT、DT CWT、DD-DT CWT 结合 Sure 软阈值、自适应 Sigmoid 函数^[11]、局部方差估计的 BSF 构成的不同去噪算法对仿真含噪 SAR 图像进行降噪实验. 仿真含噪 SAR 图像经不同算法降噪后的图像如图 5 所示,从图上可以看出,在同一阈值函数下,DD-DT CWT 的去噪效果比其它两种小波算法好;在同一种小波算法下,结合具有局部方差估计的 BSF 构成的降噪算法的降噪效果要好于软阈值和自适应 Sigmoid 函数. 可以看出,DD-DT CWT 结合局部方差估计的 BSF 构成的降噪算法的结果优于文中的其它算法.

仿真含噪 SAR 图像,经 DWT、DT CWT、DD-DT CWT 结合不同阈值函数构成的降噪算法处理后,各处理方

法的去斑质量评估参数如表 1 所示. 可以看出,在同一阈值函数下,DD-DT CWT 方法处理后图像的 $PSNR$ 、 S/MSE 、 CR 、 $1/RR$ 的值均大于 DWT 和 DT CWT 处理后的相应参数值;在同一小波算法下,用局部方差估计的 BSF 降噪后图像的 $PSNR$ 、 S/MSE 、 CR 、 $1/RR$ 的值均大于用软阈值函数和自适应 Sigmoid 函数降噪后的值. 对以上实验结果分析可得出:DD-DT CWT 结合局部方差估计的 BSF 构成的降噪算法对仿真含噪 SAR 图像降噪,降噪后图像的 $PSNR$ 、 S/MSE 最大,噪声被有效去除,而且处理后图像的 CR 、 $1/RR$ 最大,说明图像的细节特征得到较大程度的保留,这与从图 5 中得到的结论相一致.

表 1 各处理方法相干斑抑制质量评估参数的比较

处理方法	阈值函数	$PSNR$ (dB)	S/MSE (dB)	RR	CR
DWT	软阈值	23.9137	10.2834	0.4204	0.7026
	Sigmoid	25.1250	10.5738	0.4189	0.7257
	BSF	26.9808	10.7529	0.3923	0.7369
DT CWT	软阈值	26.0248	10.9123	0.4137	0.7538
	Sigmoid	27.0384	10.6856	0.3997	0.7871
	BSF	28.2934	11.1579	0.3558	0.7993
DD - DT CWT	软阈值	29.2213	11.5315	0.3728	0.7865
	Sigmoid	30.7821	11.8663	0.3501	0.8034
	BSF	33.5792	12.8695	0.2852	0.8504

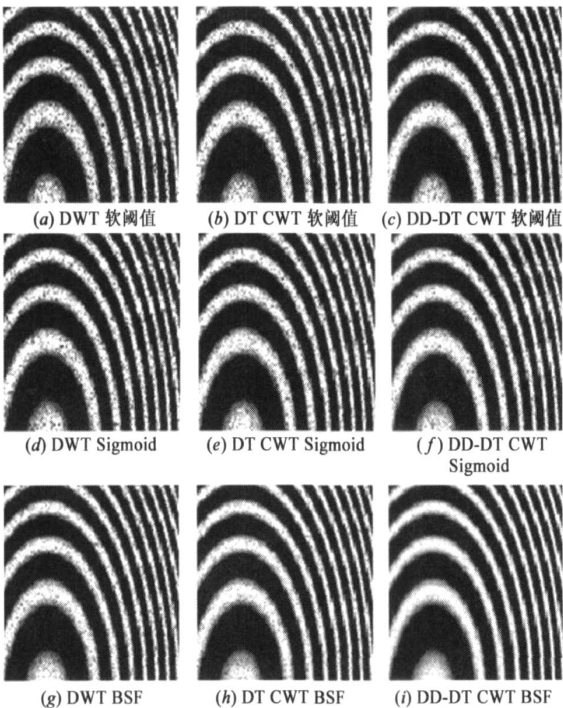


图 5 仿真含噪 SAR 图像经不同算法降噪后的结果

5.2 实际 SAR 图像实验

选取含有较多方向条纹和一定相干斑噪声的某地区农田实际星载 SAR 图像,分别采用 DWT、DT CWT 和 DD-DT CWT 结合局部方差估计的 BSF 构成的相干斑抑制算法对图像进行处理,并将得到的结果进行比较. 原

图像和不同算法降噪处理后的图像如图 6 所示,不同算法处理后的相干斑抑制质量评估参数比较列于表 2.

表 2 实际 SAR 图像经不同算法处理后的相干斑抑制质量评估参数比较

处理方法(BSF)	$PSNR$ (dB)	S/MSE (dB)	RR	CR
未降噪	23.5797	10.0000	0.4278	0.6139
DWT	25.1359	11.2591	0.3625	0.7864
DT CWT	27.8214	11.8365	0.3437	0.8038
DD-DT CWT	31.3568	12.5813	0.3323	0.8743

从图 6 的视觉比较可以发现,基于 DD-DT CWT 结合局部方差估计的 BSF 构成的相干斑抑制算法得到的图像,较其他图像去掉了更多的噪声,图像平滑度更好,原图像的纹理和细节特征被更多地保留,可以得到较好的主观图像质量.

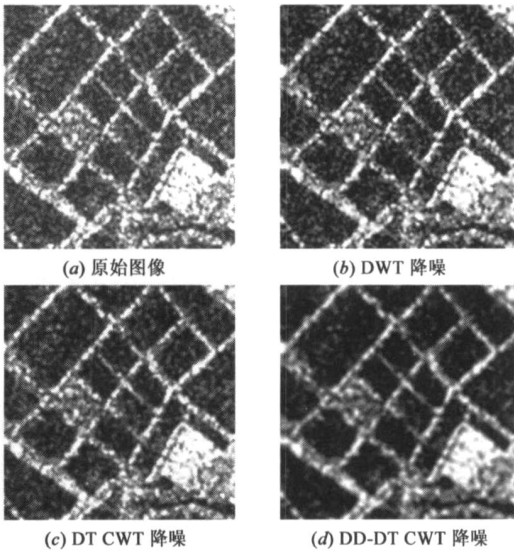


图 6 实际 SAR 图像经不同小波算法结合 BSF 降噪后结果

通过表 2 参数的比较可知,基于 DD-DT CWT 结合局部方差估计的 BSF 构成的算法处理后的图像,在各项参数上都要好于其它两种方法,特别是在反应边缘细节保留程度的 CR 参数上提升更明显,从抑制质量评估参数的角度说明了本文算法的有效性.

以上比较说明,无论在视觉上,还是抑制效果评估参数的角度,本文方法在各类合成孔径雷达图像相干斑抑制算法中是具备优势的. 应注意的是,相比较其它小波方法,DD-DT CWT 具有较大的数据冗余性,其变换系数比输入信号需要更多的存储空间和时间. 但是去噪处理是属于 SAR 图像后处理的范畴,完全在地面进行,实时性要求不高. 下一步将继续研究改进算法,减少计算冗余量,使算法的实用性更好.

6 结束语

针对传统小波阈值降噪方法的不足,本文基于 DD-DT CWT 结合局部方差估计的 BSF 设计降噪算法实现 SAR 图像降噪. 由于双密度双树复数小波变换具有平

移不变性、良好的方向性和精确的相空间信息等特性,局部方差估计的BSF考虑父代和子代小波系数的相关性,很好的处理了平滑效果和保留细节信息的矛盾,两者的结合进一步提高了算法的降噪性能.在仿真SAR图像和实际SAR图像的实验中,已经通过多种算法的比较分析证明了这一点.实验结果的分析表明,DD-DT CWT结合局部方差估计的BSF构成的算法能够有效实现合成孔径雷达图像降噪,并且较好的保留原图像的细节信息,是一种有效的SAR图像相干斑抑制算法.

参考文献:

- [1] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(5): 613 - 627.
- [2] Selesnick I W, Baraniuk R G, Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Signal Processing magazine (S1053 - 5888), 2005, 22(6): 123 - 151.
- [3] Selesnick I W. The double-density dual-tree DWT[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2004, 52(5): 1304 - 1314.
- [4] Kingsbury N G. The dual-tree complex wavelet transform: a new technique for shift invariance and directional filters [A]. In: Proceedings of 8th IEEE Digital Signal Processing Workshop [C], Bryce Canyon, Utah, USA, 1998. 86 - 89.
- [5] Strela V, Portilla J, Simoncelli E. Image denoising using a local Gaussian scale mixture model in the wavelet domain [A]. SPIE Proc. of 45th Annual Meeting [C]. San Diego, CA, USA: SPIE, 2000. 363 - 371.
- [6] Sendur L, Selesnick I W. Bivariate shrinkage functions for wavelet-based denoising exploiting interscale dependency [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(11): 2744 - 2756.
- [7] Oliver, Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images [M]. Norwood: Artech House Inc, 1998. 96 - 99.
- [8] Pesquet J C, Leporini D. Bayesian wavelet denoising: Besov priors and non-Gaussian noises [J]. Signal Processing, 2001, 81(1): 55 - 66.
- [9] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81: 425 - 455.
- [10] Ian G. Cumming, Frank H. Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithm and Implementation [M]. Norwood: Artech House Inc, 2005. 80 - 96.
- [11] J R Sveinsson, J A Benediktsson. Almost translation invariant wavelet transformations for speckle reduction of SAR images [J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(10): 2404 - 2408.

作者简介:

郭巍男, 1981年生于山东泰安. 博士研究生, 研究方向为合成孔径雷达图像分析与目标识别.

E-mail: guowei26@126.com

张平男, 1949年生于北京. 研究员, 博士生导师, 研究方向为机载、星载合成孔径雷达系统测控技术.