

基于斑点方差估计的非下采样 Contourlet 域 SAR 图像去噪

常 霞¹,焦李成¹,刘 芳^{1,2},沙宇恒¹

(1. 西安电子科技大学智能感知与图像理解教育部重点实验室和智能信息处理
研究所,陕西西安 710071;2. 西安电子科技大学计算机学院,陕西西安 710071)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)图像固有的相干斑噪声严重影响图像质量,使得 SAR 图像的自动解译十分困难. 本文联合 SAR 图像的统计特性和非下采样 Contourlet 对 SAR 图像细节信息的良好刻画能力,提出一种新的非下采样 Contourlet 域 SAR 图像去噪算法,通过估计到的各个高频方向子带的斑点噪声方差和变换系数模值的局部均值,对非下采样 Contourlet 变换系数进行判定,保留信号系数,抑制斑点噪声系数,实现 SAR 图像去噪. 仿真实验结果表明,本文方法在斑点抑制的同时可以有效保持细节信息.

关键词: SAR 图像去斑; 非下采样 Contourlet 变换; 小波变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1328-06

SAR Image Despeckling Based on the Estimation of Speckle Variance in Nonsampled Contourlet Domain

CHANG Xia¹, JIAO Li-cheng¹, LIU Fang^{1,2}, SHA Yu-heng¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education of China, Institute of Intelligent Information Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China; 2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) images are inherently degraded by speckle noise, that severely affects the image qualities and makes the automatic interpretation of the image data very difficult. Combine the SAR image statistical property with the favorable capability of nonsampled contourlet transform on describing SAR images detail information, a novel SAR image despeckling method is presented. We estimate the speckle variance in each high-frequency directional subband. The local directional statistical information and the estimated speckle variance is used to classify the nonsampled contourlet transform coefficients as signal and noise coefficients. The SAR image despeckling is implemented by retaining signal coefficients and restraining noise coefficients. Experimental results demonstrate that the proposed despeckling method can preserve detail information effectively and reduce the speckle noise at the same time.

Key words: SAR image despeckling; nonsampled contourlet transform; wavelet transform

1 引言

由于具有全天时、全天候成像、高空间分辨率和强穿透能力等诸多优点,合成孔径雷达(SAR)已经越来越广泛地应用到国防建设和经济建设的各个领域.然而,不同于其他遥感图像(全色图像、多光谱图像等),SAR 图像会受到其自身固有的相干斑噪声的影响.这些在 SAR 图像中随机散布的相干斑,会与较小的地物目标掺

杂在一起,严重影响图像的质量,对图像的自动解译造成很大困难^[1].因此,SAR 图像相干斑抑制成为 SAR 图像处理的关键步骤,也是后续 SAR 图像特征提取、分割、识别的基础. SAR 图像去斑需要对同质区域进行有效滤波的同时,尽可能多得保持 SAR 图像的方向以及纹理等重要信息.

SAR 图像斑点抑制方法,有传统的基于空域的滤波方法^[2],包括 Lee 滤波、Gamma Map 滤波和维纳滤波等.

收稿日期:2009-04-08;修回日期:2010-01-24

基金项目:国家自然科学基金(No.60972148, No.60702062, No.60971128, No.60803097);国家 863 高技术研究发展计划(No.2008AA01Z125, No.2009AA12Z210);国家部委科技项目(No.XADZ2008159, No.51307040103);教育部重点项目(No.108115);国家教育部博士点基金(No.200807010003);国家 973 重点基础研究发展规划(No.2006CB705707);中央高校基本科研业务费专项资金(No. JY10000902001, No. JY10000902038, No. JY10000902032)

这些基于空域的滤波方法,难以保持图像的细节特征,其滤波性能的好坏,很大程度依赖于所选滤波窗口的大小.随着多分辨分析的发展,小波变换在 SAR 图像的降斑领域中得到了成功应用^[3~5].小波域 SAR 图像斑点噪声抑制方法分别在具有下采样分解机制和非下采样分解机制的两类小波变换域中展开.实践证实了,具有平移不变性的非下采样小波变换在去噪综合性能上要优于下采样小波变换.虽然小波分析具有优秀的时域、频域局部分析能力,但是在高维的情况下,其并不能“最优逼近”具有线或面奇异性的函数,导致大量无效分解.在 SAR 图像相干斑抑制的处理中,小波分析往往无法有效保留原始 SAR 图像中的边缘和轮廓等细节信息.近年来,人们提出新的多尺度几何分析工具,用来解决二维或是更高维奇异性^[6].其中,Arthur L. da Cunha 等人提出的非下采样 Contourlet 变换(NSCT)^[7],具有完全的平移不变性,在图像去噪、增强和融合的应用中已经崭露头角^[7~10].

本文利用 NSCT 对 SAR 图像细节信息的刻画能力,联合 SAR 图像的统计特性,在 NSCT 域内对各个高频方向子带的斑点噪声方差进行有效估计.考虑到高频方向子带变换系数的局部聚集性,本文采用变换系数模值的局部均值和估计到的噪声方差将其区分为信号或是噪声的变换系数,最后保留信号系数,抑制斑点噪声系数,实现 SAR 图像去噪.通过与传统的 SAR 图像滤波方法和基于小波、基于 Contourlet 变换、基于非下采样小波(NSWT)的 SAR 图像降斑方法作定性的对比和定量分析,证明了本文方法的有效性.

2 SAR 图像统计特性

相干斑是 SAR 图像本身固有的一种确定性干涉现象,是成像散射体散射回波的相干作用造成的^[11].传统的相干斑抑制技术是在成像之前对图像进行多视处理.多视处理可以有效抑制斑点噪声,但会降低空间分辨率.随着 SAR 图像应用领域的不断拓展,多视处理技术已不能满足高空间分辨率的要求,目前成像后的滤波技术:空域滤波和变换域滤波成为 SAR 图像斑点噪声抑制的发展主流.

SAR 图像的斑点噪声是乘性噪声,可以表示为如下形式:

$$X = Y \cdot Z \quad (1)$$

其中, X 是强度测量值, Y 为雷达反射系数,即无噪信号, Z 是规范化的相干斑噪声,考虑 X 和 Y 是相互独立的. L 视 SAR 图像强度 X 的条件概率密度函数分布为:

$$p_{X|Y}(x|y) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{y}\right)^L x^{L-1} e^{-Lx/y} \quad (2)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数.当 $L = 1$ 时,即单视 SAR 图像

的情况下,式(2)为指数分布.

雷达反射系数 Y 的 Gamma 密度表达式为:

$$P_Y(y) = \frac{v^v}{\mu_Y^v \Gamma(v)} y^{v-1} e^{-vy/\mu_Y} \quad (3)$$

其中 $v = \mu_Y^2/\sigma_Y^2 = 1/C_Y^2$,用来衡量参考区域的异质程度, μ_Y 是参考区域的平均雷达反射系数,可以通过计算 SAR 图像在参考区域的均值得到, σ_Y^2 是 SAR 图像在参考区域的方差.

规范化相干斑噪声 Z 服从均值为 1, 方差为 $\frac{1}{L}$ 的 Gamma 分布,其概率分布为:

$$p_Z(z) = \frac{L^L z^{L-1} e^{-Lz}}{\Gamma(L)}, \quad z \geq 0 \quad (4)$$

当 $L = 1$ 时,式(4)简化为均值为 1 的指数分布.

3 NSCT 域 SAR 图像统计去斑

3.1 非下采样 Contourlet 变换

NSCT 是 Contourlet 变换^[12]的平移不变版本,是一种多尺度、多方向、局域过完备图像表示方法,拥有比轮廓波变换更加丰富的基函数集合,可以提供更好的频率选择性和正则性,有利于更好地捕捉图像中的细节信息. NSCT 的构造基于非下采样的塔形分解(NSP)和非下采样的方向滤波器组(NSDFB),两部分之间相互独立.如图 1(a)所示.首先 NSP 把输入图像作尺度分解,在每个尺度上,DFB 再将分解后得到的带通信号分解到几个方向子带,方向子带的数目可以是 2 的任意次幂(图 1(b)).这一过程可以在 NSP 输出的低通子带重复迭代地进行.

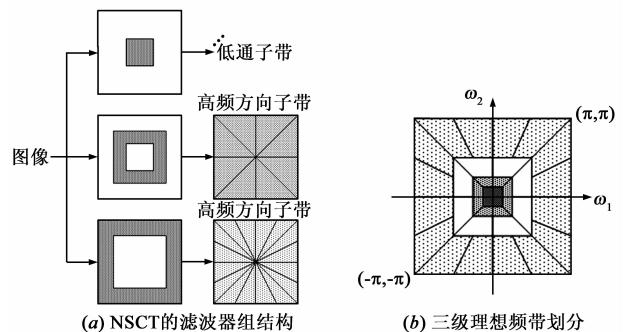


图1 NSCT实现结构和频带划分示意图

对信号进行 J 层 NSP 分解的等价滤波器由下式给出:

$$H_l^{eq}(z) = \begin{cases} H_1(z^{2^{j-1}}) \prod_{j=0}^{J-2} H_0(z^{2^j}) & , 1 \leq l < 2^J \\ \prod_{j=0}^{J-1} H_0(z^{2^j}) & , l = 2^J \end{cases} \quad (5)$$

这里 z^j 代表 $[z_1^j, z_2^j]$, $H_1(\cdot)$ 表示高通滤波, $H_0(\cdot)$ 表示低通滤波.将信号与相应的滤波器进行卷积,我们就可

以获得图像的多尺度分析.

NSDFB的基本构建块是一种两通道的滤波器组,它可以把频率平面剖分为楔形高频方向子带.迭代 NSDFB,可以获得更细的方向分解.NSDFB通过一个梅花形矩阵 \mathbf{Q} 上采样所有的滤波器,如下式所示:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

重采样操作由以下四个么模矩阵来完成,可以达到旋转滤波器通带方向的目的.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_0 &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{R}_2 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{R}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

通过两层 NSDFB 方向滤波,能够得到四个高频方向子带,从第三层开始,NSDFB 在前半个信道利用 \mathbf{R}_0 和 \mathbf{R}_1 重采样,产生方向在 $+45^\circ$ 和 -45° 之间的高频方向子带,后半信道利用 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{R}_3 重采样,产生其余方向的高频方向子带.

NSCT是冗余的,不同于 Contourlet 展开式,NSCT 的冗余度为 $R = \sum_{l=0}^{J-1} 2^{K_l} 2^{K_l}$ 是在尺度 2^{-l} 上的高频方向子带数目.在面向去噪、融合、增强等应用时,冗余度的大小并不是我们需要解决的主要问题,构造一个冗余的变换,就有可能采用更为丰富的基函数集来更有效地表达某些信号,这时,冗余变换的执行效果要明显超出非冗余变换.

3.2 基于 NSCT 的 SAR 图像斑点方差估计

由于 SAR 图像的斑点噪声是乘性的,所以很多去斑方法在去噪时,首先对 SAR 图像作对数变换,试图在统计意义上将乘性噪声转化为人们所熟悉的加性噪声,以方便后续的去噪处理,并在去噪结束后对图像进行指数变换将其转化为非对数格式.然而,斑点噪声经对数变换后的均值并不等于零,这就需要对恢复的 SAR 图像进行修正来避免额外的失真.

不对 SAR 图像作对数变换,我们将上式(1)表示成如下的加性模式:

$$X = Y + Y(Z - 1) \quad (8)$$

其中 $(Z - 1)$ 是零均值的随机变量.这样,在类似线性变换中,乘性的斑点噪声不需要进行对数变换就可以转换成加性噪声来处理.

SAR 图像的 NSCT 变换可以表示成如下形式:

$$\begin{aligned} C_X &= C[X] = C[Y \cdot Z] = C[Y + Y(Z - 1)] \\ &= C[Y] + C[Y(Z - 1)] = C_Y + C_B \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $C(\cdot)$ 表示 NSCT 系数, $C(Y)$ 表示信号的 NSCT 系数, $Y(Z - 1)$ 加性的且依赖于信号的噪声, $C(B)$ 对应于这种噪声的 NSCT 系数且 $C_B = C[Y(Z - 1)]$. 因此,空

间域中斑点噪声 Z 的方差估计问题转化为对 NSCT 域下 C_B 的方差 $\sigma_{C_B}^2$ 的估计问题.

这里,定义一个等价滤波器操作算子 $C_{k_l}^l = H_l^{m_l} \cdot U_{k_l}^{n_l}$, 其中 $H_l^{m_l}$ 表示 NSP 滤波, $U_{k_l}^{n_l}$ 表示 NSDFB 滤波. a_u , a_v 表示信号在卷积过程中的位移量,将该算子与原始 SAR 图像 X 进行卷积可以获得第 l 层 NSCT 分解的第 k_l 个高频方向子带,即有:

$$C_X(a, b) = [C_{k_l}^l X]_{a, b} \quad (10)$$

$$C_X(a, b) = \sum_{\substack{m_1, m_2, \dots, m_l, \\ n_1, n_2, \dots, n_k}} H \times U \times X(a + a_u, b + b_v) \quad (11)$$

假设随机变量 C_X 的概率分布为 P_{C_X} , 则 C_X 的矩函数可以定义为:

$$\Phi(s) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{C_X}(x) e^{sx} dx \quad (12)$$

$$\psi(s) = \ln(\Phi(s)) \quad (13)$$

由式(11)可知,随机变量 $C_X(a, b)$ 是多个随机变量 $\{X(a + a_u, b + b_v) | a_u, b_v\}$ 的线性组合,假设这些随机变量独立同分布.由 X 概率密度函数的二阶矩可得 C_X 的二阶矩:

$$\psi_{C_X}(s) = \sum_{\substack{m_1, m_2, \dots, m_l, \\ n_1, n_2, \dots, n_k}} \psi_X(H \times U s) \quad (14)$$

由 $\psi_{C_X}(s)$ 在原点的 n 阶导数可以获得 C_X 的 n 阶累积量:

$$\psi_{C_X}^{(n)}(0) = \sum_{\substack{m_1, m_2, \dots, m_l, \\ n_1, n_2, \dots, n_k}} (H \times U)^n \times \psi_X^{(n)}(0) \quad (15)$$

$$\text{令 } S_{k_l}^{l(n)} = \sum_{\substack{m_1, m_2, \dots, m_l, \\ n_1, n_2, \dots, n_k}} (H \times U)^n.$$

由式(3)和式(4)反射系数和斑点噪声的概率分布,可得:

$$\mu_n = \Phi_X^{(n)}(0) = \frac{\mu_Y^n \Gamma(L + n) \Gamma(v + n)}{v^n L^n \Gamma(L) \Gamma(v)} \quad (16)$$

由式(15), C_X 的二阶累积量可由 X 的二阶累积量获得:

$$\psi_{C_X}^{(2)}(0) = S_{k_l}^{l(2)} \psi_X^{(2)}(0) = S_{k_l}^{l(2)} (\mu_Z - \mu_Y^2) \quad (17)$$

$$\psi_{C_X}^{(2)}(0) = S_{k_l}^{l(2)} \left(\frac{\mu_Y^2 \Gamma(L + 2) \Gamma(v + 2)}{v^2 L^2 \Gamma(L) \Gamma(v)} - \mu_Y^2 \right) \quad (18)$$

C_X 的二阶累积量是 C_X 的方差,可以表达为 $C_Z^2 = 1/L$ 和 $C_Y^2 = 1/v$ 的函数:

$$\sigma_{C_X}^2 = \psi_{C_X}^{(2)}(0) = S_{k_l}^{l(2)} \mu_Y^2 (C_Y^2 (1 + C_Z^2) + C_Z^2) \quad (19)$$

假设 C_Y 和 C_B 分别服从高斯分布 $N(0, \sigma_{C_Y}^2)$ 和 $N(0, \sigma_{C_B}^2)$, 而由 $E[C_Y C_B] = C_{k_l}^l C_{k_l}^l E^2[Y] E[Z - 1] = 0$, 可得 C_Y 与 C_B 独立,由式(19)可得:

$$\sigma_{C_Y}^2 = S_{k_l}^{l(2)} \mu_Y^2 C_Y^2 \quad (20)$$

$$\sigma_{C_B}^2 = \psi_{C_B}^{(2)}(0) = S_{k_i}^{l,(2)} \mu_Y^2 C_Z^2 (1 + C_Y^2) \quad (21)$$

由式(19)和 $C_{C_X} = \sigma_{C_X} / \mu_X$ 得到:

$$C_Y^2 = \frac{C_{C_X}^2 - S_{k_i}^{l,(2)} C_Z^2}{S_{k_i}^{l,(2)} (1 + C_Z^2)} \quad (22)$$

将式(22)和 $C_{C_X} = \sigma_{C_X} / \mu_X$ 代入式(21)可得:

$$\sigma_{C_B}^2 = \frac{S_{k_i}^{l,(2)} \mu_X^2 + \sigma_{C_X}^2}{1 + C_Z^2} C_Z^2 \quad (23)$$

其中 μ_X 和 σ_{C_X} 分别为原始 SAR 图像的均值和 NSCT 高频方向子带系数的方差, 强度 SAR 图像斑点噪声的规范化标准差 $C_Z = \sqrt{1/L}$, 对于幅度 SAR 图像有 $C_Z = \sqrt{(4\pi - 1)/L}$ ($L \geq 1$ 为 SAR 图像的视数). 通过计算 $\sigma_{C_B}^2$ 即可得到 NSCT 域各个高频方向子带的斑点噪声方差估计.

3.3 基于 NSCT 的 SAR 图像去斑

NSCT 不仅能够提供图像的多尺度的分析, 还可以捕捉图像的几何多方向信息. 在 NSCT 的高频方向子带中, 噪声不具有几何结构, 其系数值比较小, 而边缘信息具有几何结构, 尤其是强边缘点, 其系数值较大. 由此, 我们可以根据 NSCT 对图像的几何表达来区分噪声和有用信号的系数. NSCT 分解后各个子带的大小与原图像相同, 且各个子带上的每个系数与原始图像相应位置上的像素一一对应. 为了提高 NSCT 多方向选择特性的自适应调节机制, 增强降斑方法的细节保持能力, 利用式(23), 我们对各个高频方向子带的斑点噪声方差分别进行估计. 考虑到 NSCT 高频子带分解系数具有局部聚集性, 即如果某一个 NSCT 分解系数(小), 则其相邻系数很可能也大(小), 我们采用系数模值的局部均值 $mean$ 而不是单个系数的模值与估计到的噪声方差, 将 NSCT 变换系数区分为信号或是噪声的变换系数, 判定准则如下:

$$\begin{cases} \text{signal,} & \text{if } mean[|C_X(a, b)|] \geq k\sigma_{C_B} \\ \text{noise,} & \text{if } mean[|C_X(a, b)|] < k\sigma_{C_B} \end{cases} \quad (24)$$

其中 k 在 1~5 之间取值, $mean[|C_X(a, b)|]$ 是以高频方向子带系数 $C_X(a, b)$ 为中心的 5×5 大小的局部区域内系数模值的均值. 对判定后的 NSCT 变换系数进行如下去噪操作.

$$y(a, b) = \begin{cases} C_X(a, b), & \text{signal pixels} \\ 0, & \text{noise pixels} \end{cases} \quad (25)$$

这里 $y(a, b)$ 为去噪后的系数, 对 $y(a, b)$ 进行逆 NSCT 即得到去斑后的图像. 基于斑点方差估计的 NSCT 域 SAR 图像去噪, 具体实现步骤如下:

步骤 1 输入 SAR 图像 X , 并对其进行 NSCT 分解, 得到低频子带 $D_L(a, b)$ 和不同尺度上的高频方向

子带 $C_X(a, b)$;

步骤 2 利用式(23)估计不同尺度各个高频方向子带的斑点方差 $\sigma_{C_B}^2$;

步骤 3 利用高频方向子带系数 $C_X(a, b)$ 模值的局部均值和 $\sigma_{C_B}^2$, 根据式(24)将高频方向子带系数区分为信号或是噪声的变换系数, 保留信号系数, 抑制斑点噪声系数;

步骤 4 对步骤 1 中得到的低频子带 $D_L(a, b)$ 和去噪后的高频方向子带系数 $y(a, b)$ 作 NSCT 逆变换, 得到去噪后的 SAR 图像.

4 仿真结果与分析

为了验证算法的性能, 将本文算法与传统的 SAR 图像 Lee 滤波方法和基于小波(WT)、基于 Contourlet 变换(CT)、基于 NSWT 的 SAR 图像软阈值降斑方法进行比较. 用作对比的方法, 在对 SAR 图像进行滤波处理前需对其进行对数同态变换, 滤波后进行指数变换, 得到最终的去噪图像. Lee 滤波采用 5×5 的窗口; 小波变换和 NSWT 选择 DB4 小波基函数; Contourlet 变换采用经典的‘9-7’塔型分解和‘pkva’方向滤波器组; NSCT 变换选择‘maxflat’非下采样塔型分解和‘dmaxflat7’非下采样方向滤波器组. 由粗尺度到细尺度, Contourlet 变换和 NSCT 变换的高频方向子带数目分别为 2、4、8. 仿真实验中用作测试的 SAR 图像 1 和图像 2 分别为 Ku 波段 4 视数和 X 波段 2 视数的强度 SAR 图像, 分辨率为 1m, 具有丰富的边缘轮廓和细节信息(点目标、线目标), 均采用三层变换分解.

表 1 SAR 图像 1 不同降斑方法的相干斑抑制性能对比

	原图	Lee	WT	CT	NSWT	NSCT
ENL	11.189	69.938	66.659	78.978	85.285	116.790
MR	1.000	1.053	1.057	1.061	1.062	1.000
STD	38.424	28.818	28.923	28.615	28.087	30.469

表 2 SAR 图像 2 不同降斑方法的相干斑抑制性能对比

	原图	Lee	WT	CT	NSWT	NSCT
ENL	8.079	84.520	56.086	96.292	78.664	106.857
MR	1.000	1.207	1.190	1.214	1.188	1.000
STD	38.241	24.491	28.036	25.558	25.855	28.307

表 1 和表 2 给出不同去噪方法的性能参数. SAR 图像中通常采用等效视数 ENL 来评价去噪方法的平滑效果. $ENL = \mu^2 / \sigma^2$, 这里 μ 和 σ^2 分别是 SAR 图像同质区域的均值和方差, ENL 值越大, 噪声抑制效果越好. 在实验中, 选取 SAR 原图中方形框标示的同质区域作为测试数据计算等效视数. 均值比 MR 用于衡量去噪图像对原始图像辐射特性的保持情况, 均值比越接近 1, 表明辐射特性保持得越好. 标准差 STD 反映的是图像中像素的灰度值与灰度平均之间的分散程度, 通过抑制性

滤波,相干斑噪声的强度减弱,图像的方差减小.从等效视数上来看,本文的基于 NSCT 的方法要高于其他方法,这与视觉上的观察相符.表 1 和表 2 中的均值比和标准差是对整幅待测 SAR 图像计算得到的.本文的算法对应的均值比结果也最好,去噪结果与原图辐射特性保持一致.五种方法结果的标准差都比原图有所下降,表示这些方法都达到了滤波的作用.

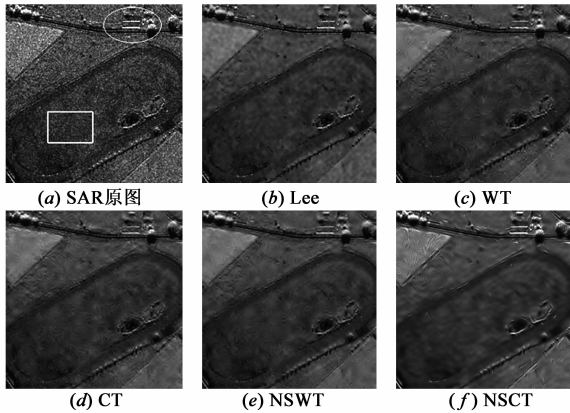


图2 SAR图像1相干斑抑制结果

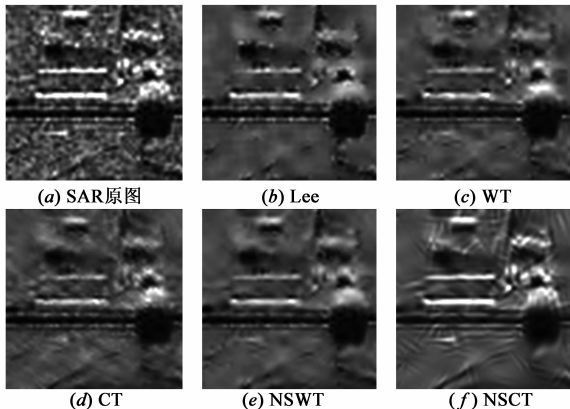


图3 SAR图像1相干斑抑制结果局部放大图

图 2 和图 4 给出了不同方法对真实 SAR 图像的去噪结果.为了考察去噪方法对细节信息的保持能力,我们将相干斑抑制结果中存在明显地物目标的区域进行

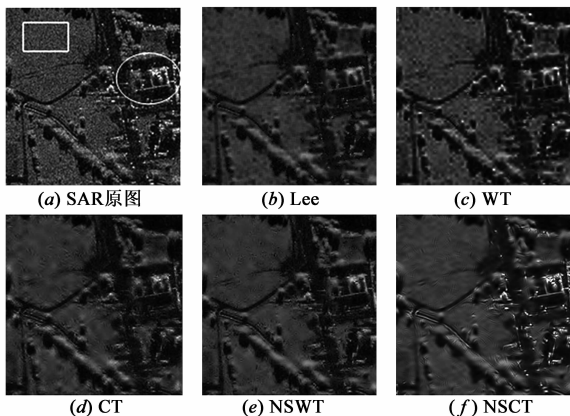


图4 SAR图像2相干斑抑制结果

局部放大(图 3 和图 5),所对应的局部区域在原图中用椭圆框出.从视觉效果上分析, Lee 滤波可以对斑点噪声进行很好的平滑,但是模糊了区域的边界,丢失了一些细节信息.基于小波的方法和基于 Contourlet 的方法,由于采用的是非平移不变的信号表示,所以易在边缘附近产生抖动,使得一些细小的边缘无法得到保持.基于 NSWT 的去噪结果整体清晰度较高.相比于以上几种算法,本文的基于 NSCT 的方法在提高了同质区域平滑性的同时,很好地保持了边缘、点目标和线目标,增强了图像的可解释性.但是,可以看到,本文方法在图中的某些局部区域会产生划痕,这与 NSCT 方向滤波器组的选取有关系,随着 NSCT 的发展会得到进一步地完善.

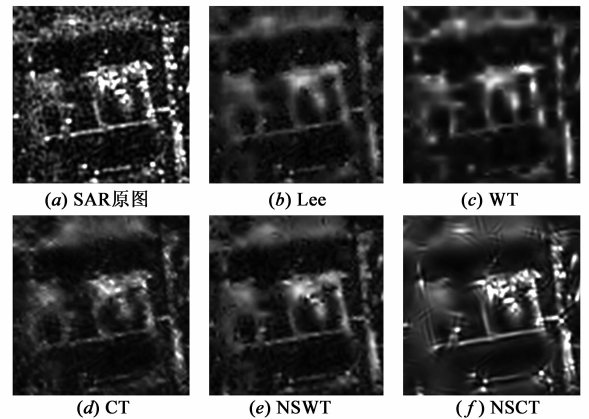


图5 SAR图像2相干斑抑制结果局部放大图

通过以上分析可以得出,不论是从视觉上的主观评价,还是从定量的客观评价指标来看,本文的方法都具有优势.

5 结论

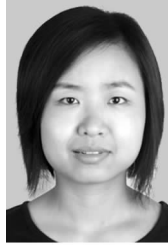
本文利用 NSCT 对 SAR 图像细节信息的刻画能力,联合 SAR 图像的统计特性,提出一种新的 NSCT 域 SAR 图像去噪算法.该算法在不同方向子带进行斑点方差统计估计,利用统计决策解决了传统的阈值估计问题,针对不同 SAR 图像的斑点噪声在不同方向子带的统计特性自适应地进行斑点抑制.仿真实验结果表明,本文方法在相干斑抑制的同时,可以很好地保持图像的细节信息,是一种有效可行的 SAR 图像去噪方法.

参考文献:

- [1] Oliver C J. Information from SAR images [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1991, 24(9): 1493 - 1514.
- [2] Gagnon L, Jouan A. Speckle filtering of SAR images-A comparative study between complex-wavelet based and standard filters [J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3169: 80 - 91.
- [3] Foucher S, Benie G B, Boucher J-M. Multiscale MAP filtering

- of SAR images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(1): 49 – 60.
- [4] Dai M, Peng C, Chan A K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642 – 1648.
- [5] Solbo S, Eltoft T. A stationary wavelet-domain Wiener filter for correlated speckle [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 1219 – 1230.
- [6] 焦李成, 谭山. 图像的多尺度几何分析: 回顾和展望 [J]. 电子学报, 2003, 31(12A): 1975 – 1981.
Jiao Licheng, Tan Shan. Development and prospect of image multi-scale geometric analysis [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12A): 1975 – 1981. (in Chinese)
- [7] Da Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design, and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089 – 3101.
- [8] 贾建, 焦李成, 孙强. 基于非下采样 Contourlet 变换的多传感器图像融合 [J]. 电子学报, 2007, 35(10): 1934 – 1938.
Jia Jian, Jiao Licheng, Sun Qiang. The nonsubsampling Contourlet transform in multisensor image fusion [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(10): 1934 – 1938. (in Chinese)
- [9] 梁栋, 殷兵, 于梅等. 基于非抽样 Contourlet 变换的自适应阈值图像增强算法 [J]. 电子学报, 2008, 36(3): 527 – 530.
Liang Dong, Yin Bing, Yu Mei, et al. Image enhancement based on the nonsubsampling contourlet transform and adaptive threshold [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 527 – 530. (in Chinese)
- [10] 常霞, 焦李成, 贾建华. 基于非下采样 Contourlet 的多传感器图像自适应融合 [J]. 计算机学报, 2009, 32(11): 2229 – 2238.
- Chang Xia, Jiao Licheng, Jia Jianhua. Multisensor image adaptive fusion based on nonsubsampling contourlet [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(11): 2229 – 2238. (in Chinese)
- [11] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images [M]. USA: SciTech Publishing, 2004. 75 – 119.
- [12] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(12): 2091 – 2106.

作者简介:



常霞 女, 1982 年 1 月出生于宁夏平罗。现为西安电子科技大学智能信息处理研究所博士研究生, 从事多尺度几何分析, 图像处理方面的有关研究。

E-mail: changxia0104@163.com



焦李成 男, 1959 年 10 月出生于陕西白水。现为西安电子科技大学教授、博士生导师、中国电子学会理事、IEEE 高级会员, 主要从事信号与图像处理、自然计算和智能信息处理等方面的研究工作。

E-mail: lchjiao@mail.xidian.edu.cn

