

# 基于非下采样 Contourlet 域局部高斯模型和 MAP 的 SAR 图像相干斑抑制

凤宏晓, 侯彪, 焦李成, 卜晓明

(西安电子科技大学智能信息处理研究所及智能感知与图像理解教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘要:** 对 SAR 图像应用非对数加性模型, 通过研究 SAR 图像中同质区域在非下采样 Contourlet 域的分布特性, 提出对非下采样 Contourlet 域中、与同质区域相对应的平稳区域的非对数加性噪声使用高斯分布建模. 基于该模型, 利用局部滑动窗口和对非对数加性噪声方差的自适应估计, 在最大后验准则的基础之上求得真实信号的非下采样 Contourlet 系数. 由于未对图像进行对数变换, 本文算法很好地保持了原始图像的辐射特性, 相干斑被有效地抑制, 均匀区域很少有伪吉布斯效应, 同时边缘纹理清晰. 无论视觉效果还是客观评价指标本文算法都优于许多现存的抑斑算法.

**关键词:** SAR 图像抑斑; 非下采样 Contourlet 变换; 局部高斯模型; 最大后验

**中图分类号:** TN957      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 04-0811-06

## SAR Image Despeckling Based on Local Gaussian Model and MAP in NSCT Domain

FENG Hong-xiao, HOU Biao, JIAO Li-cheng, BU Xiao-ming

(*Institute of Intelligent Information Processing and Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*)

**Abstract:** Applying nonlogarithmic additive model for SAR image, the distribution characteristic of SAR image isotropic regions are researched in Nonsubsampled Contourlet Transform (NSCT) domain, and then Gaussian Model is proposed to model the nonlogarithmic additive noise of the isotropic region in NSCT domain. Based on this model, we apply local sliding windows and adaptively estimate the variation of the nonlogarithmic additive noise, and then the solution of real NSCT coefficient is determined by using Maximum a Posteriori (MAP). Without applying logarithmic transform for original SAR image, the proposed method holds a good ability of radiometric preservation, the speckle is despeckled well while has less Pseudo-Gibbs phenomenon in uniform regions, edges and textures of despeckled image are also clear. Our algorithm possesses high performance over many traditional algorithms according to vision or objective evaluation.

**Key words:** SAR image despeckling; Nonsubsampled Contourlet Transform; Local Gaussian Model; maximum a posteriori

### 1 引言

SAR(Synthetic Aperture Radar)是一种先进的主动式微波成像雷达,对地物具有全天时、全天候成像的特点. SAR在成像过程中由于电磁波相干,会产生随机散布在图像各个部分的斑点噪声—即相干斑(Speckle),相干斑降低了SAR图像的实际分辨率,增加了人工判读和自动解译的难度.文献[1,2]指出一个“好”的抑斑算法应该做到:(1)有效去除均匀场景中的斑点噪声;(2)尽可能保留边缘和纹理特征;(3)不产生伪吉布斯效应;(4)保持图像的雷达辐射特性.通常,SAR图像的相干斑抑

制方法可分为两类:多视处理和滤波处理.多视处理方法简单,但降低了图像的分辨率,而滤波处理则可以避免这些缺点.

基于滤波处理的、传统 SAR 图像相干斑抑制通常在空(图像)域实现.目前常见的空域经典滤波器包括:增强 Lee 滤波<sup>[3]</sup>、Frost 滤波<sup>[4]</sup>和 Gamma MAP 滤波<sup>[5]</sup>等.空域的滤波方法通常假设图像在小区域内满足一定的特性,但这些假设在有时与实际情况不符,这使得空域的这些滤波方法在抑斑实现区域平滑和纹理保留之间很难达到很好的折中.近些年,伴随着小波的发展和推广,基于小波的 SAR 图像抑斑方法层出不穷,例如:基

于小波变换<sup>[6,7]</sup>和平稳小波变换<sup>[8,9]</sup>的方法.小波能很好地描述点奇异性,但却不能有效地刻图像中的二维线奇异性.为了克服这些不足,Do和Vetterli提出了Contourlet变换<sup>[10]</sup>,但由于下采样机制的采用使其不具备平移不变性,在抑斑后容易出现伪吉布斯效应.非下采样Contourlet变换(Nonsampled Contourlet Transform-NSCT)<sup>[11]</sup>的提出则很好地解决了这个问题,目前在SAR图像抑斑中已经得到了应用<sup>[12]</sup>.

SAR图像的相干斑被认为是乘性的.通常的抑斑思路是:先对图像进行对数变换,噪声模型由乘性转变为加性,此时假设加性对数噪声为零均值高斯白噪声进行去噪处理.文献[13]指出,SAR图像经对数变换后,其噪声部分不是零均值的,这导致图像抑斑前后均值相差较大,使图像整体变暗,不能很好的保持原始的辐射特性,影响了后期对图像的自动解译.在本文中引入非对数加性模型<sup>[6,8,14]</sup>,则避免了对数变换带来的这些不足.SAR图像可以看成是由许多小的同质区域组成,在这些小区域内相干斑可以看成是完全发展(Fully Development)的,通过研究同质区域内的非对数加性噪声在NSCT域系数的分布特性,本文提出使用高斯模型在NSCT域对同质区域内的非对数加性噪声系数建模,应用最大后验(Maximum a Posteriori-MAP)获得了真实地物后向散射强度的NSCT系数.实验证明,无论从视觉角度还是客观评价指标,本文抑斑算法的性能都优于许多现存的抑斑算法.

## 2 非下采样 Contourlet<sup>[10,11]</sup>

Contourlet变换的基本思想是用一个类似小波的多尺度分解捕捉边缘奇异点,根据方向信息将位置相近的奇异点汇集成轮廓段.在离散化实现时,图像经过拉普拉斯金字塔后,低频部分被移除,高频部分经过方向滤波器组后被分解为频率子带,逐渐将点奇异连接成线形结构.同时低频部分可以进入下一层分解,以获取更细节的轮廓信息.图1给出了Contourlet多层分解的示意图.应用多孔算法(*à trous*),构造非下采样金字塔滤波器和方向滤波器组,并采用和Contourlet类似的分解策略可以实现非下采样Contourlet变换.

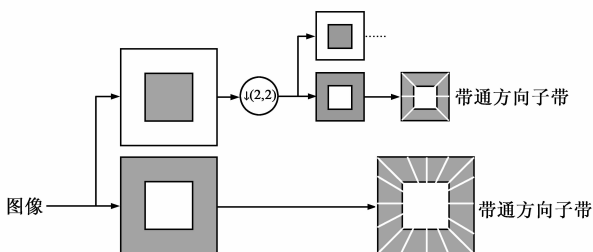


图1 图像的Contourlet分解示意图

## 3 SAR图像的相干斑模型

### 3.1 乘性模型

SAR图像的相干斑普遍公认是乘性的,表示为:

$$I = RX \quad (1)$$

$I$ 代表雷达回波观测信号的强度, $R$ 代表相干斑,其均值为1,方差为 $\sigma_R^2$ . $X$ 代表地物的真实后向散射强度. $R$ 和 $X$ 在统计上是相互独立的两个随机过程.根据上述特性,我们可得到地物真实后向散射强度 $X$ 的一阶和二阶统计表示:

$$m_X = E(X) = \frac{E(I)}{E(R)} = E(I) = m_I \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_X^2 &= E(X^2) - E^2(X) = E(X^2) - E^2(I) \\ &= \frac{E(I^2)}{\sigma_R^2 + 1} - E^2(I) = \frac{\sigma_I^2 - \sigma_R^2 m_I^2}{\sigma_R^2 + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

### 3.2 非对数加性模型<sup>[6,8,14]</sup>

根据式(1),可得到

$$I = RX = X + (R - 1)X = X + N \quad (4)$$

从抑斑的角度看,SAR图像抑斑的目标就是从观测信号 $I$ 中去除 $N$ 从而恢复真实后向散射强度 $X$ .此时, $N = (R - 1)X$ 可认为是和真实信号 $X$ 相关的噪声,在形式上 $X$ 和 $N$ 之间是加性的.利用这种模型可以避免传统取对数把乘性转换成加性模型而带来的一些不足,例如不能很好的保持原图的辐射特性,所以称之为非对数加性模型.噪声 $N$ 的一阶和二阶统计特征由下面的公式给出:

$$m_N = E[(R - 1)X] = E(R - 1)E(X) = 0 \quad (5)$$

$$\sigma_N^2 = \frac{\sigma_R^2}{\sigma_R^2 + 1} (\sigma_I^2 + m_I^2) \quad (6)$$

## 4 NSCT域的局部高斯模型

### 4.1 完全发展的相干斑(Fully Development Speckle)

若假设:

(1)在SAR一个空间分辨单元内有足够多的散射元出现,每个分辨单元都是多个电磁波散射元之间的充分相干的结果;

(2)这些相干的散射元之间是相互独立的;

(3)每个分辨单元内不存在占支配地位的散射元.

则在上面的假设下的相干斑称之为完全发展的相干斑<sup>[15]</sup>.通常SAR图像中的同质区域(Homogeneous Region)内的相干斑满足完全发展的特性.

### 4.2 NSCT域的相干斑局部模型

通常图像可看成是由一个个小的同质区域组成<sup>[16]</sup>,这种小区域的极限情况就是单个像素.A.Lopes等指出<sup>[3]</sup>同质区域内的地物真实后向散射强度是一个常数.对于任意一个同质区域 $\Omega$ ,可给出式(4)的一种

特殊形式:

$$I_{\Omega} = X_C + N_{\Omega} \quad (7)$$

$X_C$  是一个未知常数,表示该同质区域内的真实后向散射强度.

与图像空域相类似,在 NSCT 域的每个高频子带也存在和空域同质区域相对应的平稳区域  $C_{\Omega}$ ,在区域  $C_{\Omega}$  内式(7)可以表示成:

$$C_l^{j,k} = C_X^{j,k} + C_N^{j,k}, j=1,2,\dots,J, k=1,2,\dots,d_j \quad (8)$$

式(8)中, $j$  表示分解层数, $k$  表示子带的方向,设非下采样 Contourlet 分解了  $J$  层,在第  $j$  层的方向数为  $d_j$ .

### 4.3 NSCT 域的局部高斯模型

目前,对于 SAR 图像在变换域的统计分布的研究已经取得一些进展,已提出的分布模型有:对称  $\alpha$  平稳分布<sup>[7]</sup>,广义高斯分布<sup>[17]</sup>等等.这些模型都只是在正交小波或平稳小波域描述真实信号的后向散射强度  $X$ ,并没有涉及到对式(4)中  $N$  在变换域统计分布的研究.

本文通过研究平稳区域  $C_{\Omega}$  中的噪声系数  $C_N^{j,k}$ ,提出使用零均值高斯分布对式(8)中噪声系数  $C_N^{j,k}$  建模,表示为:

$$f(C_N^{j,k}) = \frac{1}{\sigma_{C_N} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(C_N^{j,k})^2}{2\sigma_{C_N}^2}} \quad (9)$$

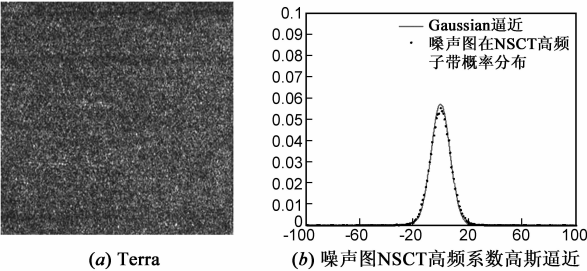


图2 高斯分布对Terra噪声图的NSCT高频系数拟合情况

为了证明本文提出的分布模型的正确性,选取来自于国内某机载 SAR 对地面成像的同质区域(图 2(a),记为 Terra)和来自 RadarSat 对海面成像的同质区域(图 3(a),记为 Sea).图 2(a)和图 3(a)中的相干斑满足完全发展的特性,可用公式(7)对其建模.根据式(5)可知,式(7)中的  $X_C = E(I_{\Omega})$ ,应此对图 2(a)和图 3(a)直接减去其均值就可以得到噪声图  $N_{\Omega}$ .图 2(a)和图 3(a)的噪声图作四层 NSCT 分解,图 2(b)和图 3(b)给出了

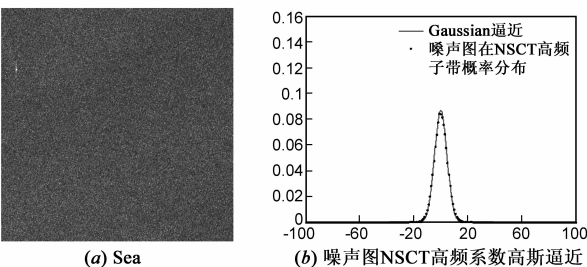


图3 高斯分布对Sea噪声图的NSCT高频系数拟合情况

噪声图  $N_{\Omega}$  在最细尺度 NSCT 系数使用零均值高斯分布的逼近结果.可以看出高斯模型可以非常好的模拟同质区域内的非对数加性噪声在 NSCT 域的分布特性.

### 5 基于 NSCT 域局部高斯模型和 MAP 准则的相干斑抑制

本文在第 4 小节中已经给出了在 NSCT 域和空域同质区域相对应的平稳区域  $C_{\Omega}$ ,然而实际中  $C_{\Omega}$  是不规则的,其确定是非常困难的.在本节中,定义一个正方形窗口  $W$ ,当  $W$  的尺寸相对比较小时, $C_{\Omega}$  就可以使用  $W$  来近似.在窗  $W$  内,与式(8)等价的表示是(这里略去了上标  $j$  和  $k$ ):

$$C_l^W = C_X^W + C_N^W \quad (10)$$

在式(10)中  $C_N^W$  满足零均值的高斯分布. $C_X^W$  在窗  $W$  内可以认为是一个未知常数,但是在整个子带内满足高尖峰、长拖尾的分布特性,因此从整个子带考虑这个未知常数将满足一定分布函数.零均值 Laplace 分布具有很好的高尖峰、长拖尾特性,在本文中,对  $C_X^W$  采用零均值 Laplace 建模.为了后面讨论的方便,将略去式(10)中的上标  $W$ .

在 NSCT 域,SAR 图像抑斑的目标就是从  $C_l$  中恢复  $C_X$ ,假设  $\hat{C}_X$  表示对  $C_X$  的最优估计,根据最大后验(MAP)准则:

$$\hat{C}_X = \arg \max [f_{C_X} | c_l(C_X | C_l)] \quad (11)$$

根据贝叶斯公式:

$$\begin{aligned} \hat{C}_X &= \arg \max [f_{C_X} | c_l(C_X | C_l)] \\ &= \arg \max [f_{C_l} | c_X(C_l | C_X) f(C_X)] \\ &= \arg \max [f(C_N) f(C_X)] \\ &= \arg \max [\ln f(C_N) + \ln f(C_X)] \end{aligned} \quad (12)$$

设  $C_X$  的方差为  $\sigma_{C_X}^2$ ,  $C_N$  的方差为  $\sigma_{C_N}^2$ ,式(12)被转化为:

$$\begin{aligned} \hat{C}_X &= \arg \max \left[ \ln f\left(\frac{1}{2\sigma_{C_X}} e^{-\frac{|C_X|}{\sigma_{C_X}}}\right) + \ln f\left(\frac{1}{\sigma_{C_N} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{C_N^2}{2\sigma_{C_N}^2}}\right) \right] \\ &= \arg \max \left[ -\frac{|C_X|}{\sigma_{C_X}} - \frac{C_N^2}{2\sigma_{C_N}^2} \right] = \arg \min \left[ \frac{|C_X|}{\sigma_{C_X}} + \frac{C_N^2}{2\sigma_{C_N}^2} \right] \end{aligned}$$

设  $g(C_X) = \frac{|C_X|}{\sigma_{C_X}} + \frac{C_N^2}{2\sigma_{C_N}^2}$ ,令  $\frac{dg(C_X)}{dC_X} = 0$ ,求得:

$$\hat{C}_X = C_l - \text{sign}(C_X) \frac{\sigma_{C_N}^2}{\sigma_{C_X}} \quad (13)$$

在实际中,  $\text{sign}(C_X) \sigma_{C_N}^2 / \sigma_{C_X}$  可以看成是一个阈值,对  $C_l$  收缩后其符号是不改变的,因此  $C_X$  和  $C_l$  具有相同的符号,那么式(13)可以被表示成:

$$\hat{C}_X = C_l - \text{sign}(C_l) \frac{\sigma_{C_N}^2}{\sigma_{C_X}} \quad (14)$$

一般情况下,  $\sigma_{C_N}^2$  可以使用式(6)粗略的估计, 但是由于随着 NSCT 分解层数增加, 受非下采样机制的影响,  $\sigma_{C_N}^2$  的大小也随之表现出一定的变化<sup>[20]</sup>. 此时, 式(6)估计的结果误差太大. 鉴于 Contourlet 可以看成是 Curvelet 的一种特殊情况<sup>[10]</sup>, 受文献[21]在子带中使用 median 法自适应估计噪声方差的启示, 在本文中为了提高  $\sigma_{C_N}^2$  的估计精度, 对第  $j$  层、第  $k$  个方向的子带噪声方差  $\sigma_{C_N}^2$  使用 median 法估计:

$$\sigma_{C_N}^{j,k} = \frac{\text{median}(C^{j,k})}{0.6745}, j=1, 2, \dots, J, k=1, 2, \dots, d_j \quad (15)$$

在 NSCT 域, 设窗  $W$  的尺寸为  $M \times M$ , 在第  $j$  层、第  $k$  个方向的子带内, 以当前系数为中心的窗  $W$  内的  $\sigma_{C_N}^2$  可由下式计算:

$$\sigma_{C_N}^2 = \max(0, \frac{1}{M^2} \sum_{a,b \in W} \{ [C^{j,k}(a,b)]^2 - (\sigma_{C_N}^{j,k})^2 \}) \quad (16)$$

根据式(16)计算结果对每个系数点使用式(14)收缩, 即得最终抑斑结果. 由于随着 NSCT 分解层数的增加, 平稳区域  $C_\Omega$  会不断的变大, 因此窗  $W$  的尺寸也应该随着分解层数的增加而变大, 设在第一层时窗的大小为  $M_0 \times M_0$ , 设分解的总层数为  $J$ , 在本文中, 第  $j$  层窗  $W$  的尺寸计算由式(17)给出:

$$M_j = M_0 + 2(j-1), j=1, 2, \dots, J \quad (17)$$

## 6 评价指标及实验结果

### 6.1 评价指标

SAR 图像抑斑效果的好坏需要由主观和客观两方面评价, 但是主观评价往往带有不确定性. 为了客观评价 SAR 图像的抑斑效果, 在本文中使用了以下两个方面的客观评价准则:

(1) 等效视数 (Equivalent Number of looks- ENL): 表示图像的平滑程度, ENL 值越大, 平滑程度越高, 其表达式为<sup>[18]</sup>

$$ENL = A \left( \frac{M_{\text{hom}}}{S_{\text{hom}}} \right)^2 \quad (18)$$

这里,  $M_{\text{hom}}$  和  $S_{\text{hom}}$  分别为图像同质区域的均值和标准差, 对于强度和幅度图像  $A=1$  和  $4/\pi-1$ . 在计算 ENL 时, 要选择尽可能大的同质区域作为测试数据.

(2) 比值图像评价: 在理想情况下, 原始图像与抑斑后图像的比值即为斑点噪声图像. 对比值图像, 通常使用下面两种评价指标:

① 均值. 在理想情况下, 比值图像的均值为 1. 均值反映了抑斑算法对图像辐射特性保持程度<sup>[1]</sup>, 比值图像均值越接近 1, 抑斑图像辐射特性保持越好.

② 方差. 对于强度格式的 SAR 图像, 理想情况下, 比值图像的方差为  $1/L$  ( $L$  代表图像的有效视数<sup>[19]</sup> (Effective Looks)); 对于幅度格式的 SAR 图像, 比值图像的方差为  $(4/\pi-1)/L$ . 方差反映了抑斑算法对原始图像的边缘和纹理的保留程度, 越接近理想值说明保留越好.

### 6.2 实验结果

为了验证本文算法的有效性, 实验中使用三幅 SAR 图像作为测试图像: (1) 图 4(a), 英国 Bedford-shire 地区, X 波段, 3m 分辨率, 2 视幅度 SAR 图像 ( $256 \times 256$ , Field); (2) 图 5(a), 英国 Bedford 附近, X 波段, 3m 分辨率, 6 视强度 SAR 图像 ( $256 \times 256$ , Bedford); (3) 图 6(a), 国内某机场, 1m 分辨率, 2 视幅度 SAR 图像 ( $512 \times 512$ , Airport). 在实验中, 本文算法分别与增强 Lee 滤波、基于平稳小波 (SWT) 的软阈值收缩、基于 Contourlet 变换 (CT) 的自适应软阈值收缩和基于非下采样 Contourlet 的 SAR 图像抑斑<sup>[12]</sup> 比较. 其中基于 SWT、CT 和 NSCT 的对比方法均对图像进行对数变换. 平稳小波收缩时, 选取的阈值为:  $T = \sigma \sqrt{2 \ln(m \times n)}$ ,  $\sigma$  表示对数变换后噪声的标准差,  $m \times n$  表示原始图像的尺寸. 基于 CT 的方法选取  $T = 3\sigma$  作为阈值. 本文算法中, 选取初始窗的尺寸  $M_0 = 5$ , NSCT 分解 4 层, 方向数依次为: [16 8 4 4]. 为了对比公平, 基于 CT 和 NSCT 的对比方法的分解层数和方向数完全与本文算法一致.

为了对比各个算法的抑斑平滑效果, 在图 4(a) 选择三个同质区域, 计算这些区域的 ENL, 结果由表 1 给出. 比值图像的评价结果由表 2 给出. 图 Field、Bedford 和 Airport 的各种抑斑结果比较分别由图 4(b)~(f)、图 5(b)~(f) 和图 6(b)~(f) 给出. 需要说明的是图 4(a) Field 在名义上的视数为 2 视, 而其有效视数大约为 3 视, 在 SAR 图像评价时, 方差的计算要依据其有效视数<sup>[1,19]</sup>.

通过对比表 1, 本文算法对同质区域相干斑的抑制能力是最优的, 图 4(f) 和图 5(f) 在同质区域平滑的视觉效果要明显好于其它几种算法. 与其它几种算法相比, 本文算法在同质区域产生的伪吉布斯效应也是最弱的. 由于原始图像未进行对数变换, 对比表 2 中的数据, 可以看到本文算法对图像均值的保留是最优的, 很好的保持了图像的辐射特性, 图像在亮度上要明显优于其它算法. 需要说明的是, 表 2 中本文算法所得到的比值图像的均值是在一定精度下的结果, 所以在形式上与理想值一致. 对比图 4(b)~(f) 右下、图 5(b)~(f) 左下以及图 6(b)~(f) 右侧的纹理可以看出, 本文算法得到的抑斑图像的纹理清晰, 纹理区域的斑点噪声也得到了有效的抑制.

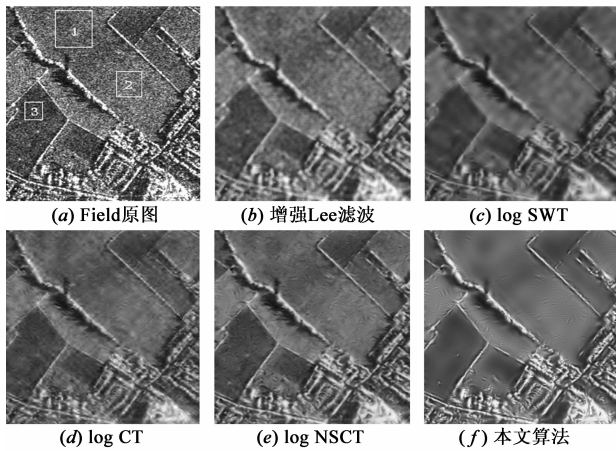


图4 Field抑斑结果比较

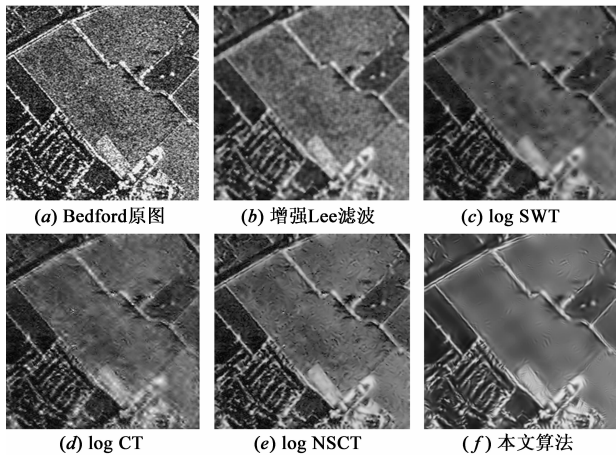


图5 Bedford抑斑结果比较

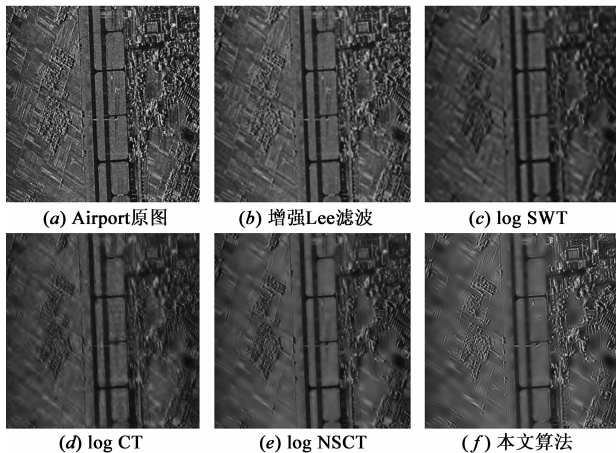


图6 Airport抑斑结果比较

表 1 Field 均匀区域等效视数比较

	区域 1(50 × 50)	区域 2(35 × 35)	区域 3(25 × 25)
原图	2.8941	3.1279	2.7441
增强 Lee	31.7674	74.2905	100.4264
log SWT	20.1788	31.8188	46.1399
log CT	28.6328	61.4121	33.1198
log NSCT	27.7008	60.7046	36.4988
本文算法	62.1579	91.6119	109.1246

表 2 比值图像的均值和方差比较

	图 4 比值图像		图 5 比值图像		图 6 比值图像	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
增强 Lee	1.0044	0.1005	1.0065	0.1407	1.0048	0.1630
log SWT	1.1924	0.1502	1.2454	0.2313	1.2829	0.4810
log CT	1.1173	0.1162	1.1833	0.2047	1.2524	0.3899
log NSCT	1.0701	0.0701	1.1056	0.0987	1.1565	0.2240
本文算法	1.0000	0.0738	1.0000	0.1464	1.0000	0.1259
理想值	1.0000	0.0911	1.0000	0.1667	1.0000	0.1366

## 7 结束语

本文通过研究 SAR 图像中相干斑具有完全发展特性的同质区域,应用非对数加性模型,提出在 NSCT 域对 SAR 图像同质区域在非对数加性模型下的噪声应用高斯分布建模,基于 MAP 准则获得了真实信号 NSCT 系数的解.相比传统的相干斑抑制算法,本文算法未对图像进行对数变换,有效的保持了原图像的辐射特性,对 SAR 图像的同质区域抑斑效果性能优良,纹理区域的相干斑得到有效的去除,纹理结构清晰,各项客观评价指标都优于现存的许多方法.在本文中,所选用的窗的形状是固定的,实际图像中同质区域的形状是变化的,具有形状自适应性的窗将获得更好的抑斑效果.因此,更加精确、具有自适应性的窗需要进一步的研究.

## 参考文献:

- [1] C Oliver, S Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Boston MA: Artech House, 1998. 158 - 186.
- [2] 刘振华,于文震,毛士艺. SAR 图像组合降斑算法[J]. 电子学报, 2004, 32(3): 363 - 367.  
LIU Zhen-hua, YU Wen-zhen, MAO Shi-yi. Compounding reconstruction for Synthetic Aperture Radar images [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 363 - 367. (in Chinese)
- [3] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [J]. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(6): 992 - 1000.
- [4] Frost V S, Stiles J A. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(2): 157 - 166.
- [5] Lopes A, Nezry E, Touzi R, et al. Maximum a posterior filtering and first order texture models in SAR images [A]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium '90 [C]. Washington, D C, 1990. 2409 - 2412.
- [6] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. Despeckling SAR images using a low-complexity wavelet denoising process [A]. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium '02 [C]. Toronto, 2002. 321 - 324.
- [7] Achim A, Tsakalides P, Bezerianos A. SAR image denoising

- via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(8): 1773 – 1784.
- [8] Argenti F, Alparone L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2363 – 2374.
- [9] Stian S, Torbjørn E. A stationary wavelet-domain wiener filter for correlated speckle [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(4): 1219 – 1230.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 郭旭静, 王祖林. SAR 图像的非下采样 Contourlet 噪声抑制算法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 894 – 897.  
Guo Xu-Jing, Wang Zu-Lin. Nonsubsampling Contourlet speckle reduction algorithm for SAR images [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 894 – 897. (in Chinese)
- [13] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(3): 721 – 727.
- [14] Gleich D, Datcu M. Gauss-Markov model for wavelet-based SAR image despeckling [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(6): 365 – 368.
- [15] Maitre H 著 (法), 孙洪等译. 合成孔径雷达图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 69 – 71
- [16] Lee J S, Hoppel K, Mango S. Unsupervised estimation of speckle noise in radar images [J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 1992, 4(4): 298 – 305.
- [17] Argenti F, Bianchi T, Alparone L. Multiresolution MAP despeckling of SAR images based on locally adaptive generalized gaussian pdf modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 15(11): 3385 – 3399.
- [18] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(10): 2196 – 2212.
- [19] Foucher S, Boucher J M, Benie G B. Maximum likelihood estimation of the number of looks in SAR images [A]. Proceedings of Microwaves Radar and Wireless Communications [C]. IEEE Press, Vol 2, 2000. 657 – 660.
- [20] Aleksandra Pizurica. Image Denoising Using Wavelets and Spatial Context Modeling [D]. Ghent: Ghent University, June, 2002. 25 – 27.
- [21] Jean S, Candes E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image denoising [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(6): 670 – 684.

#### 作者简介:



凤宏晓 男, 1983 年生于陕西宝鸡市, 博士研究生. 感兴趣研究方向为小波分析, 自然、SAR 和医学图像处理以及多尺度几何分析.

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



侯彪 男, 1974 生于陕西陇县, 副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为多尺度几何分析, 小波分析, SAR 图像理解与解译等.