

文章编号:1004-9037(2013)06-0000-00

基于贝叶斯估计的改进 Contourlet 变换的 SAR 图像滤波

~~于 灿 曲长文 杨 俭~~

~~(海军航空工程学院电子信息工程系,烟台,264001)~~

摘要:针对小波变换和轮廓波变换在合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)图像中去噪应用的不足,结合小波变换和轮廓波变换的优点,将小波变换与轮廓波变换相结合,提出一种改进轮廓波变换方法。首先将待处理图像进行小波变换,然后对低频子带图像进行重建,得到一个细节子带图像,然后使用方向滤波器组对其进行多方向划分,再采用贝叶斯最大后验概率估计对划分后的方向子带信号进行估计。试验结果表明此方法在抑制图像斑点噪声的同时,很好地保持了均匀区域的辐射特性,保持了图像中的边缘以及细小纹理,且没有人为畸变。此外算法的高频子带图像含有更为丰富的纹理,对于边缘特征的提取非常有益。

关键词:SAR 图像;斑点噪声;Contourlet 变换;贝叶斯估计

中图分类号:TP75

文献标志码:A

Improved Denoising Method of Contourlet of SAR Image Based on Bayesian Estimation

~~Ding Can, Qu Changwen, Yang Jian~~

~~(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical &
Astronautical University, Yantai, 264001, China)~~

Abstract: According to shortcoming of Wavelet and Contourlet in the applicatiopn of SAR image denoising, taking advantage of wavelet transform and contourlet transform, the proposed method was complemented by wavelet transform in conjunction with directional filter banks. First, the proposed method derived wavelet coefficients of entry image by wavelet transform, then reconstructed the image only by lowpass coefficients and after processing it can derived a highpass subband, afterwards to partition the highpass subband into multi-direction subbands by direction filter banks. Last we adapt Bayesian maximum a posteriori probability (MAP) estimation to estimate these multi-direction subbands. The experimental results show that the proposed method can restrain the speckle noise effectively at the same time it can keep the Radiated characteristics of even region very well, it also can keep edge information effectively and avoid artifacts. Furthermore the highpass subbands image of the proposed method contains more texture, it is beneficial to extract edge feature of image.

Key words: SAR image; speckle noise; Contourlet transform; Bayesian estimation

引 言

由于 SAR 的相干成像特性,使所得到的 SAR 数字图像中都存在着相干斑噪声。相干斑的存在,

降低了图像的灰度分辨率、隐藏了图像的细节、损害了图像的质量,给目标识别和图像解译造成了极大的困难。因此,有效地抑制相干斑噪声对 SAR 图像的后续分析有着十分重要的意义。

最早运用的 SAR 图像滤波技术是空间域的滤

波方法。代表性的滤波方法是局部统计参数的滤波器^[1-4]及它们的增强型滤波器和自适应滤波方法^[5]。这些滤波器都是用局部统计参数如均值、方差等来描述真实图像,进而估计像元的真实值。这些方法适用于背景简单、纹理信息不丰富的图像,而对于复杂背景、含丰富纹理的 SAR 图像,则会产生过平滑现象,不能很好地保持边缘信息。另外,利用局部统计参数的滤波器面临两个相互关联的问题:(1)在固定大小的窗口内探测统计参数的可靠性;(2)是乘性斑点模型的可靠性问题。局部统计参数的不可靠往往伴随着乘性斑点模型的不可靠。

随后的傅里叶变换滤波算法是先把原始图像进行 FFT,在频域内根据斑点噪声和信号的频谱特性不同,进行滤波,然而傅氏变换要花费较多的时间,而且有些图像产生低频干涉效应。小波变换去噪是通过小波变换后,对小波系数进行处理来达到去噪的效果。研究较多的是通过研究斑点对小波系数影响,根据含噪小波系数的模型,对小波系数进行域值或收缩处理,然后重建 SAR 图像的方法^[6-14]。小波分析能有效地处理“点奇异”的函数类,而对于含“线奇异”的函数类,小波分析却不能达到最优的非线性逼近阶。近几年,多尺度多方向滤波算法有着突飞猛进的发展,Do 率先采用 Contourlet 进行图像滤波去噪^[15],随后即有学者对此进行各个方面的改进^[16-19],都取得了较好的效果,但也存在一些缺陷。在前人的基础上,本文提出了一种改进的 Contourlet 变换滤波方法。将小波变换与轮廓波变换相结合,首先将待处理图像进行小波变换,然后对小波变换后的低频子带图像进行重建,进而可得到一个细节子带图像,然后使用方向滤波器组对其进行多方向划分,再采用贝叶斯最大后验概率估计对划分后的方向子带信号进行估计。试验结果证明了此方法的有效性。

1 基于小波变换的 SAR 图像去噪

小波分析理论和方法从傅里叶分析演变而来。20 世纪 90 年代以来,以小波变换为代表的多分辨率分析方法近年来广泛应用于信号、图像处理的各个领域。小波去噪是小波变换的一个重要应用方面,它利用信号和噪声在小波变换的不同子带内具有不同的分布特性,在多尺度内进行灵活的处理,有效地抑制噪声。小波去噪方法的基本思想是,利用图像和噪声在小波变换域的不同统计特性,通过

各种方法尽可能地剔除噪声分量,保留信号。与傅里叶变换相比小波变换不仅能提供较精确的时域定位,而且能提供较精确的频域定位。

给定一个基本函数 $\psi(t)$, 令

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

式中: a, b 均为常数,且 $a > 0$ 。显然, $\psi_{a,b}(t)$ 是基本函数 $\psi(t)$ 先作移位再作伸缩以后得到的。若 a, b 不断变化,可得到一组函数 $\psi_{a,b}(t)$ 。给定平方可积的信号 $x(t)$, 即 $x(t) \in L^2(R)$, 则 $x(t)$ 的小波变换定义为

$$WT_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = [x(t), \psi_{a,b}(t)] \quad (1)$$

式中 a 为尺度参量, b 为平移参量。

小波变换主要有如下特点:(1)小波基函数在时域上和频域上具有局部性。(2)小波变换引入了尺度因子,其时频窗大小可以变化。对于信号的不连续点,由于它持续时间短,小波变换可提供小窗口的基函数以捕获到信号细微的变化;而为了获得详尽的信号频率分布信息,可利用大窗口的小波基函数来进行处理。(3)小波基函数的选择具有多样性,即只要满足可容许条件的小波函数都存在可逆变换。

基于小波变换的斑点滤波方法是将原始图像在水平、垂直和对角线方向进行分解,将图像分解为一个低频图像 LL1 和 3 个高频图像 LH1、HL1 和 HH1,如图 1 所示。此 3 个高频图像分别代表水平方向,垂直方向和对角线方向的边缘信息。对低频图像还可以经小波变换而分解为一个低频图像 LL2 和 3 个高频图像 LH2、HL2 和 HH2,而这一级的低频图像还可以被分解,在不同分解级别上对低频图像进行低通滤波去噪,并加上相应级别的高频图像边缘信息的同时,保留不同尺度的结构和纹理特征。与传统的统计斑点滤波器相比,基于小波变换的斑点滤波器的优点在于其多尺度频率域滤波特性,对图像的统计分布没有要求,且不会导致图像实际分辨率降低^[20]。

利用小波去除图像中噪声的方法在过去十几年间得到了广泛的关注,人们首先提出基于小波阈值的图像降噪方法^[21]并对各种阈值算法进行改进^[20],都取得了较好的效果;针对离散小波缺少冗余性的缺点,人们又提出了二进小波图像去噪方法^[22]和一种“基于树”的小波图像去噪方法^[23],在

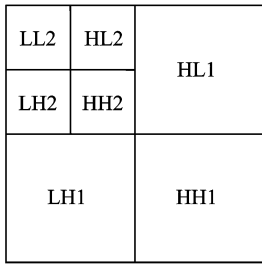


图 1 Wavelet 变换结构示意图

视觉效果上获得了较大的改进;近期又提出了小波域马尔可夫随机场先验模型的图像降噪方法^[24]及小波变换与偏微分方程相结合的图像去噪方法^[25],这些方法都取了较好的滤波效果。但是小波应用在图像处理中也存在缺陷,常用的二维小波是一维小波的张量积,它只有有限的方向,即水平、垂直、对角,方向性的缺乏是小波变换不能充分利用图像本身的几何正则性。一般认为,小波是以“点”为单位捕捉图像的特征,则不能最优表示含“线”或者“面”奇异的高维函数,这就使得小波分析在处理二维图像时表现出很大的局限性。

2 Contourlet 变换

Contourlet 是一种新的图像多尺度几何分析工具,也称为塔型方向滤波器组(Pyramidal directional filter bank, PDFB),继承了小波变换的多分辨力分析特性。但与小波变换相比具有充分捕获图像中高维奇异信息的优良性能,并且在用于图像处理时并不需要先验的知道图像本身的几何特征,它是由一种双滤波器组结构来实现的:首先对图像进行拉普拉斯塔形(Laplacian pyramid, LP)分解以捕获点状奇异性,然后由方向滤波器组(Directional filter bank, DFB)将分布在同方向上的不连续点连接成周线结构,最终以类似于周线结构来逼近原图像^[15],如图 2 所示,这种结构由 LP 滤波器与改进的方向滤波器串联组成,作一个子带的分解,分解的结果是该子带内的低频图像和带通图像的多方向分量。每一级塔形方向滤波器的输入是上一级塔形方向滤波器产生的低频图像,该级的 LP 滤波器将上一级的低频图像分解为低频图像和带通图像;带通图像被送到该级的方向滤波器作为方向分解,分解结果作为该级的方向分解输出;同时,低频图像作为该级的输出,被送到下一级塔形方向滤波器,继续作为该级相同的分解过程。如此进行下去,得到一个低频图像与多级方向分解。

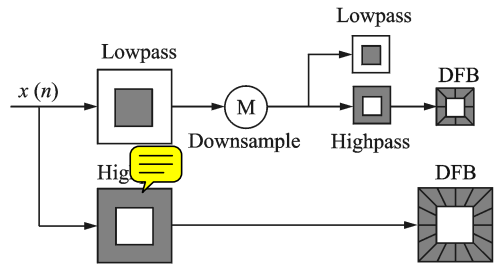


图 2 Contourlet 变换结构示意图

Contourlet 使用 LP 获得对图像的多尺度分解。在每一尺度上,LP 滤波器组将输入图像分解为两个分量:一个是输入图像的下采样低频图像,另一个是输入图像与预测值之差形成的高频图像。LP 滤波器组对输入图像的分解由两个步骤组成,分解过程如图 3 所示,第一步,首先对输入的上一尺度低频图像 x 采用二维低通滤波器 H 进行低通滤波,然后进行隔行下采样,得到低频图像 c 。第二步,对第一步得到的低频图像 c 进行上采样,并用高通滤波器 G 对上采样后的图像进行滤波,得到输入低频图像 d 的预测值 p ,然后将输入图像 x 减去预测值得到高频图像 d 。其中 H 和 G 分别表示分解和综合滤波器, M 是采样矩阵。通过 LP 分解在较粗尺度的低通信号上迭代,可以得到更细致的频率划分。LP 迭代中的低通综合滤波器 G 唯一地确定了一个多尺度函数 $\varphi(t) \in L_2$,它满足双尺度方程

$$\varphi(t) = 2 \sum_{n \in \mathbf{Z}^2} g[n] \varphi(2t - n) \quad (2)$$

式中: $\varphi_{j,n} = 2^{-j} \varphi\left(\frac{t - 2^j n}{2^j}\right)$, $j \in \mathbf{Z}, n \in \mathbf{Z}^2$,集合 $\{\varphi_{j,n}\}_{n \in \mathbf{Z}^2}$ 在尺度 2^{-j} 上对定义在间隔为 $2^j \times 2^j$ 标准网格上的子空间 V_j 来说是正交的。另外还存在一组多分辨的嵌套子带序列 $\dots V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset V_{-2} \dots$ 这里 V_j 是以 2^{-j} 的分辨率对图像进行刻画。

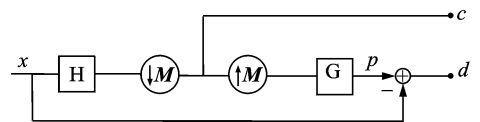


图 3 拉普拉斯金字塔分解图

Contourlet 变换既具有小波变换的多分辨特性和时频局部化特性,又具有良好的多尺度、多方向性和各向异性,即允许在不同的尺度下可以有任意不同数目的方向。此外,Contourlet 变换直接产生于离散域,使用迭代滤波器组可实现高效计算,且其采样冗余度不到 4/3。Contourlet 的诸多优

点使其在图像去噪领域中具有良好的应用前景。

3 改进 Contourlet 变换

与严格采样的小波变换相比,Contourlet 变换中 LP 滤波器的显著缺点是存在过采样和非正交特性,因此滤波后其数据量有所扩充。对于实际信号应用而言,变换后的系数会做进一步的处理,如量化或阈值截断等,这些经过后处理的系数在经过综合滤波器进行反变换重构原始信号。在这个过程中,重构算法在没有噪声的情况下能够对原始信号进行精确逼近,但是在有噪声存在的情况下其性能却迅速降低,不能达到需要的精度,会使得到的信号出现部分冗余。小波变换是临界采样的变换,滤波后并不会出现类似于 Contourlet 变换的冗余现象。

但是,塔式分解与小波分解最明显的不同之处在于,小波分解后,每个尺度上仅产生 3 个方向的细节子带图像,即水平、垂直、对角,方向性的缺乏使小波变换不能充分利用图像本身的几何正则性,进而不能最优表示含“线”或“面”奇异的高维函数。而塔式分解后只产生一个细节子带带通图像,易于后面使用方向滤波器组来对高频部分进行多方向划分,进而可以充分利用原函数的几何正则性。Contourlet 变换实质上是以线段为基来描述图像。结合小波变换和轮廓波变换的优缺点,本文将小波变换与轮廓波变换相结合,首先将待处理图像进行小波变换,然后对低频子带图像进行重建,可得到一个细节子带图像,然后使用方向滤波器组对其进行多方向划分,称此方法为 W-Contourlet,如图 4 所示。

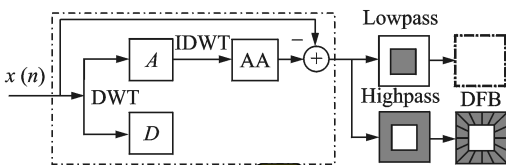


图 4 W-Contourlet 的变换结构示意图

本文方法是用虚线框内的变换方法取代拉普拉斯金字塔形分解,其中 A 表示一层小波分解后的近似图,D 表示一层小波分解后的细节图像(包括水平、垂直、对角 3 个方向的细节图像),AA 表示原图像大小的小波变换的重建图像,经过与原图像运算后得到低频子图和高频子图。由于小波变换是临界采样的且是正交变换,从而避免了 LP 分解中过采样的缺陷,更易于后续处理。所以从理论

上讲此方法既能保持临界采样又利于后面使用方向滤波器组来对高频部分进行方向划分。DFB 本质上仅适用于图像的高频分量,因为方向滤波器组可能将图像的低频分量泄露到几个方向子带中。因此在应用 DFB 之前,应用图 3 中虚线框中的变换方法将低频移出。Contourlet 变换最初采用钻石型滤波器对调制后的信号滤波以实现 DFB,但是这种方法实现起来较为复杂并且对输入信号的调制正是产生频域混叠的原因之一。本文采用扇形滤波器的 DFB 结构,避免了对输入信号的调制,并且在一定程度上避免了频域混叠的现象。

4 基于 Bayes 估计的改进 Contourlet 变换的 SAR 图像滤波

近年来文献普遍将 SAR 图像相干斑看作乘性噪声,认为这种乘性噪声与光学遥感图像的加性噪声有很大的区别。在对 SAR 图像进行 Wavelet、Contourlet 变换去噪时,往往考虑到相干斑噪声的乘性性质。这种乘性模型可由下式给出

$$Y(m, n) = X(m, n) \cdot N(m, n) \quad (3)$$

式中 Y 表示观察到的图像强度(被相干斑污染),X 表示随机的地面目标雷达散射特性(未被相干斑污染),N 表示相干斑的随机过程,并且 N 满足 $E_N = 1$, $\sigma_N = \frac{1}{\sqrt{n}}$ 。相干斑随着图像目标灰度的增加而加大,表现出斑点噪声的性质。同时,一般还假设图像相邻像素之间没有相关性。相干斑消除的问题就是求出从观察图像 Y 到 X 的映射。

对式(3)进行对数变换,从而将乘性噪声转换为加性噪声

$$\log Y(m, n) = \log X(m, n) + \log N(m, n) \quad (4)$$

两边再取小波(本文以小波为例)变换得

$$C_{a,b} = \int \log X \cdot \psi_{a,b}(x) dx + \int \log N \cdot \psi_{a,b}(x) dx \quad (5)$$

其中相干斑噪声对变换系数的贡献由上式中的第二项 $\log N$ 决定,这样就比较容易将噪声去掉,如图 5 所示。

理论上,这种方法确实可以把乘性噪声转换为加性噪声,但该方法存在不足。通常假定式(4)中的噪声 $\log N(n)$ 为零均值高斯白噪声,用 ϵ 来表示

$$\log X(m, n) = \log Y(m, n) - \epsilon \quad (6)$$

$$\hat{X} = Y \cdot e^{-\epsilon} \quad (7)$$

对于给定的 Y,有

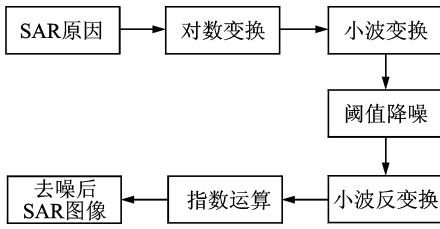


图 5 变换域去噪流程图

$$E(X(m, n)) = Y(m, n) E(e^{-\epsilon}) \quad (8)$$

当 ϵ 很小时, $e^{-\epsilon} \approx 1 - \epsilon$, 有 $E(1 - \epsilon) = 1$, 当 ϵ 大到近似关系不成立时, Y 值不能保证, 并且由于指数增长的速度很快, 使得最终图像出现很多幅度很大的假点目标。因此, 将 SAR 图像相干斑看作乘性噪声进行降噪有缺陷, 若降噪目的是为了下一阶段进行目标检测, 此种方法是不合适的^[26]。

SAR 图像斑点噪声是雷达图像分辨单元中的大量散射子回波干涉叠加的结果, 斑点噪声 $N(m, n)$ 服从单参数 Γ 分布

$$\begin{cases} N(m, n) \sim \Gamma\left(L, \frac{1}{L}\right) \\ \Gamma\left(L, \frac{1}{L}\right) = \frac{L^L}{\Gamma(L)} f^{L-1} e^{-Lf} \end{cases} \quad (9)$$

其中 L 为视数。

$$\text{从式(9)可以得到, } E(N(m, n)) = 1, \sigma_N^2 = \frac{1}{L},$$

噪声的强弱通过视数 L 来衡量

假设 SAR 图像强度值 $Y(m, n)$ 、反射率 $X(m, n)$ 和斑点噪声 $N(m, n)$ 的关系为

$$Y(m, n) = X(m, n) N(m, n) =$$

$$X(m, n) + X(m, n) (N(m, n) - 1) \quad (10)$$

式(10)的后项看作是非平稳的加性的噪声项, 公式改写为如下形式

$$Y(m, n) = X(m, n) + N'(m, n) \quad (11)$$

式中: 噪声 $N'(m, n)$ 是将要滤除的零均值加性噪声, 它和信号 $X(m, n)$ 的相关性为

$$R_{RN} = E(X(m, n) N'(m, n)) =$$

$$E(X(m, n) X(m, n) (N(m, n) - 1)) = 0 \quad (12)$$

这样所期望的噪声模型产生了, 原来的乘性噪声 $N(m, n)$ 转化为与信号强度不相关的加性噪声。

贝叶斯最大后验概率估计方法是一种应用统计学的方法, 可从受噪声污染的图像细节系数中估计原来的不受噪声影响前的系数。该方法更多依赖于图像的本身信息, 并且消噪效果要明显优于经验知识下的阈值处理方案^[27]。

改进 Contourlet 变换可将图像分解为粗略估计部分和细节部分 $d_{i,j}$, 而对细节系数部分 $d_{i,j}$ 还

可以应用方向滤波器组对其按方向信息进行划分。记第 K 方向的系数为 $d_{i,j}^k$, 它可以分解为不包含噪声成分的信号分量 $s_{i,j}^k$ 和加性噪声 $n_{i,j}^k$ 分量两部分, 如下

$$d_{i,j}^k = s_{i,j}^k + n_{i,j}^k \quad (13)$$

由于信号部分 $s_{i,j}^k$ 并不服从高斯分布^[28], 因此可采用贝叶斯最大后验概率的方法对信号部分进行估计。由于 $s_{i,j}^k$ 和 $n_{i,j}^k$ 为统计独立的, 因此有

$$\sigma_d^2 = \sigma_s^2 + \sigma_n^2 \quad (14)$$

式中: σ_s^2 代表每一子块中信号的方差, 并且其值与子块的位置无关。

σ_d^2 也为一与子块位置无关的局部方差, 计算方法如下

$$\sigma_d^2 = \frac{\left[\sum_{d \in N(k)} (d_{i,j} - \mu_d)^2 \right]}{S} \quad (15)$$

式中: $N(k)$ 代表第 k 个子块, μ_d 为该子块中像素 $d_{i,j}$ 的均值, S 代表该子块的大小。噪声标准差的估计采用下式^[29]

$$\sigma_n = \left[\frac{1}{M_i} \sum_{j=1}^{M_i} (d_{i,j} - \mu_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

式中: M_i 为尺度 i 下的分解系数的个数; μ_n 为尺度 i 下的分解系数 $d_{i,j}$ 的均值

这样, σ_s^2 可以按下述方式计算

$$\sigma_s^2 = \max(0, \sigma_d^2 - \sigma_n^2) \quad (17)$$

则基于 bayes 最大后验概率的估计值为

$$\hat{s} = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_s^2 + \sigma_n^2} \cdot d \quad (18)$$

这样, 就可以通过在每一个子块中应用上式来估计不受噪声干扰前的信号的系数值。然后就可以通过这些去除噪声后的系数来重建原图像, 从而实现 SAR 图像的相干斑噪声消除。

5 试验结果及分析

为检测本算法的有效性, 在 Windows XP, 2.19GHz, 504 M 内存下, 采用 Matlab7.04 对真实 SAR 图像进行试验。试验用的 SAR 图像是一幅由美国 Sandia 图像试验室获得的 Ku 波段机载 SAR 图像的一部分, 大小为 256×256 , 分辨率为 0.1 m, 如图所示。将本文提出的方法与常用的 SAR 图像统计斑点噪声滤波器、小波滤波器、轮廓波滤波器的滤波效果进行比较。在用统计斑点滤波器进行滤波时, 不同的滤波窗口滤波效果不同。经试验 7×7 的滤波窗口在抑制斑点噪声和保持细节方面保持相对较好^[30], 因此仅对 7×7 滤波窗口

的滤波结果进行比较。

SAR 图像斑点噪声滤波效果可以根据需要不同的方面进行评价。要全面评价 SAR 图像斑点滤波器的性能,至少应该从以下几个方面评价:

- (1) 均匀区域内辐射特性的保持和斑点抑制能力;
- (2) 边缘、细小特征和点目标的保持;
- (3) 纹理特征的保持;
- (4) 有无人为畸变;
- (5) 原图像和滤波后图像的比值图像。

均匀区域内辐射特性的保持和斑点抑制能力通过计算滤波前后均匀区域内均值(μ),标准差(σ),斑点指数(β)和等效视数来定量评价。均值反映滤波前后辐射特性的变化,图像滤波前后的均值应基本保持不变。而斑点指数和等效视数的变化则反映滤波器的斑点抑制能力,斑点指数定义为

$$\beta = \frac{\sqrt{\text{var}(x)}}{E(x)} \quad (19)$$

其中 \bar{x} 为斑点滤波后 SAR 图像的像元值。斑点指数越小,滤波效果越好。

图像的等效视数定义为

$$\text{ENL} = \frac{1}{\beta^2} \quad (20)$$

等效视数越高则滤波效果越好,边缘、细小特征、点目标和纹理特征的保持主要通过目视检验来评价。

为了定量地评价这些方法的去噪效果,选取 SAR 图像中两块均匀区域 A,B。根据原图像与去噪后图像的数据信息计算每种去噪方法在这两块均匀区域的去斑评价参数,以表征每种去噪方法的优劣。SAR 图像相干斑噪声消除的试验结果如图 6、图 7,定量评价参数见表 1,表 2。

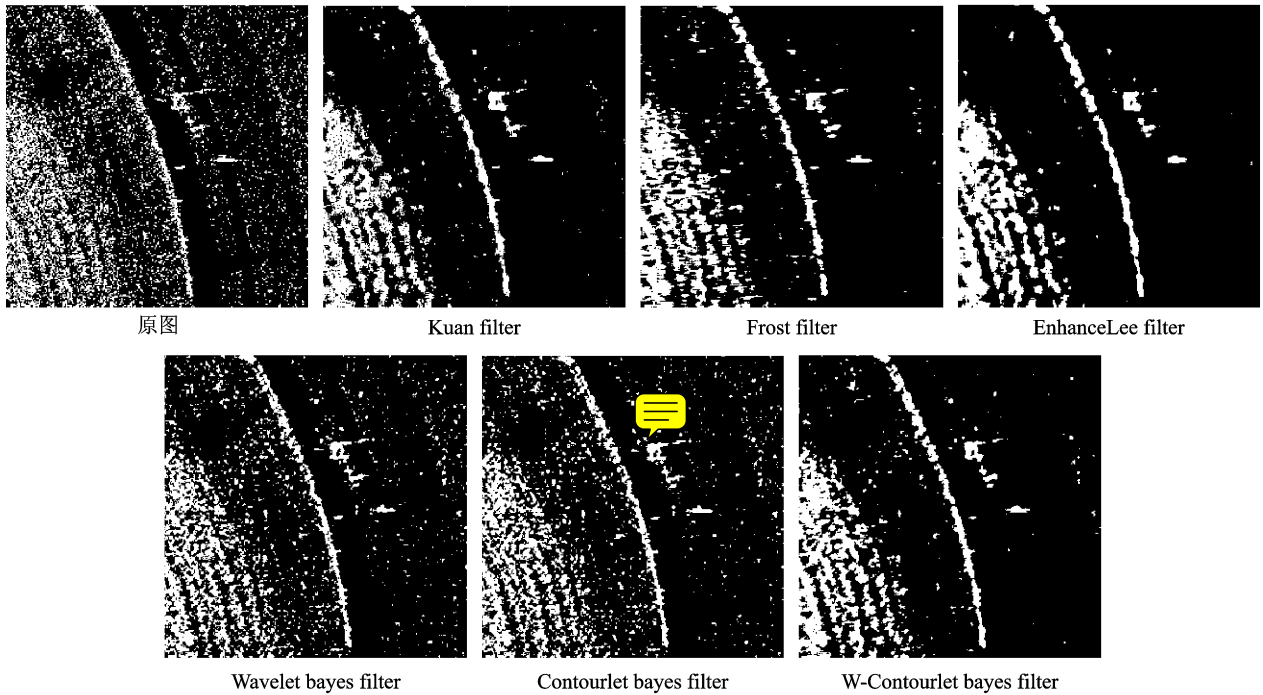


图 6 SAR 图像的相干斑消除试验结果示意图

表 1 定量评价参数

	SAR 原图	Kuan	frost	Enhancelee	Wavelet	Contourlet	W-Contourlet
μ	0.273	0.272	0.272	0.272	0.273	0.273	0.273
σ	0.144	0.057 5	0.059 7	0.044 4	0.103	0.101	0.048 6
β	0.527	0.212	0.212	0.163	0.377	0.370	0.178
ENL	3.6	22.3	20.9	37.7(4.0 s)	7.0	7.3	31.5(1.9 s)

表 2 定量评价参数

	SAR 原图	Kuan	frost	Enhancelee	Wavelet	Contourlet	W-Contourlet
μ	0.236	0.237	0.237	0.236	0.237	0.236	0.237
σ	0.130	0.055 4	0.057 8	0.045 7	0.098 9	0.095 9	0.051 5
β	0.550	0.234	0.244	0.193	0.417	0.489	0.217
ENL	3.3	18.2	16.7	36.9(3.9)	5.7	6.1	21.2(1.9 s)

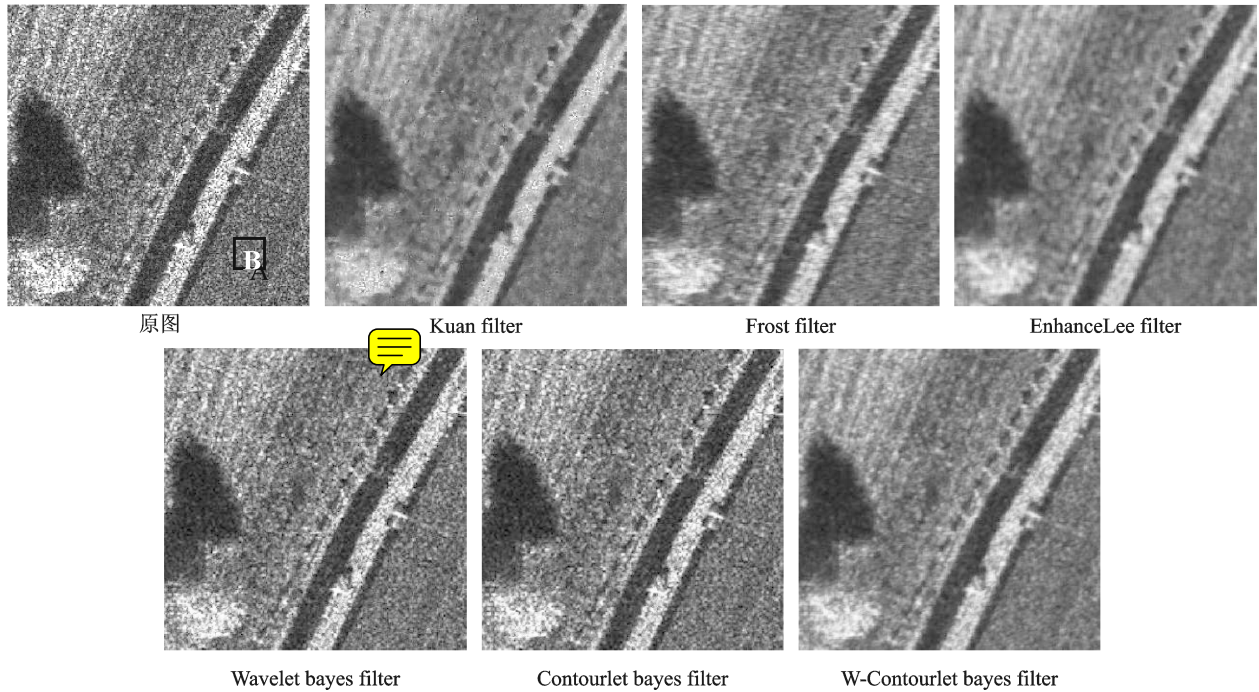


图 7 SAR 图像的相干斑消除试验结果示意图

与变换域 Bayes 去噪相比,虽然自适应统计滤波效果相对较好,但模糊了图像中的边缘信息。且在滤波后图像中,一些亮目标区存在明显的人为畸变,这种认为畸变表现为亮目标被环状噪声所包围。这种人为畸变的出现是因为在自适应局部统计滤波的参数估计过程中,当滤波窗口内存在很亮的目标时,滤波窗口内归一化方差的估计值增大而导致的。所有自适应局部统计滤波图像中细小纹理附近都被模糊甚至消失。另外变换域 bayes 方法的运算时间普遍比统计滤波算法的运算时间快 2 s。

与 Wavelet、Contourlet 贝叶斯去噪相比基于贝叶斯估计的改进 Contourlet 变换斑点噪声滤波方法在抑制图像斑点噪声的同时,很好地保持了均匀区域的辐射特性,保持图像中的边缘以及细小纹理,且没有人为畸变。

图 8 给出了四级改进前后轮廓波分解图像的结果。由图可知,对于原图像,在第 1 层进行的是小波分解,得到 4 个方向的子带图像,第 2 层进行 $2^2=4$ 方向的 DFB 滤波也得到 4 个方向的子带图像,第 3 层进行 $2^3=8$ 方向的 DFB 滤波得到 8 个方向的子带图像,第 4 层进行 $2^4=16$ 方向的 DFB 滤波得到 16 个方向的子带图像。从图可以看到改进后的轮廓波分解图像后高频方向子带上的纹理比改进前的丰富,这对于后续边缘特征的提取也非常有用。

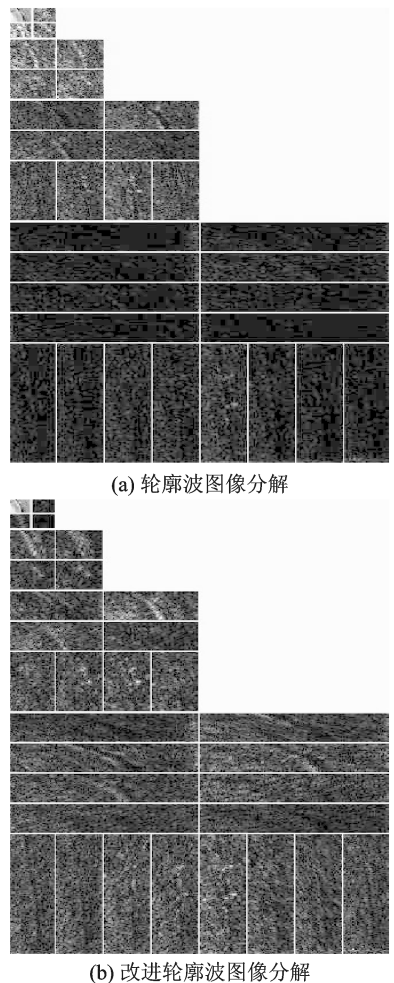


图 8 轮廓波改进前后的图像分解

本文方法也适合于光学图像的降噪,用图像质量客观评价标准峰值信噪比(Power signal-to-noise ratio, PSNR)对图像质量近似定量的评价。W-Contourlet 去噪后的 PSNR 值要比轮廓波去噪后的 PSNR 值高出 1~2 dB,也明显优于小波去噪及其他几种去噪方法。

6 结束语

斑点噪声是 SAR 图像的固有特征。在对 SAR 图像进行特征提取、目标检测和其他信息提取处理之前,必须对其进行斑点噪声滤波处理。基于局部统计的自适应斑点噪声滤波器广泛用于 SAR 斑点噪声滤波,但这些滤波器的问题在于很难在纹理细节的保持和斑点抑制能力之间取得好的平衡。基于小波分析的图像去噪可以对图像进行多尺度的频率域滤波,图像的统计分布特征没有要求,且不会导致图像实际分辨率的降低。但有限的方向性使得小波变换不能充分利用图像本身的几何正则性。Contourlet 变换既具有小波变换的多分辨特性和时频局部化特性,又具有良好的多尺度、多方向性和各向异性,且变换直接产生于离散域,使用迭代滤波器组可实现高效计算,但变换中 LP 滤波器过采样和非正交特性的显著缺点使得滤波器后其数据量有所扩充。

本文结合小波变换和轮廓波变换的优点,将小波变换与轮廓波变换相结合:首先将待处理图像进行小波变换,然后对低频子带图像进行重建,进而可得到一个高频部分图像,由于小波变换是临界采样的且是正交变换,从而避免了 LP 分解中过采样的缺陷,并更易于后续的方向滤波器组的处理。

本文选取真实机载 SAR 图像,利用改进 Contourlet 变换的方法进行斑点噪声滤波。从均匀区域内辐射特性的保持和斑点的抑制能力、边缘细小特征的保持、纹理特征的保持、是否引入人为畸变几个方面,将改进 Contourlet 的去噪效果分别与局部自适应统计滤波、小波变换、Contourlet 变换的斑点滤波效果进行比较。结果表明,基于贝叶斯估计的改进 Contourlet 变换斑点噪声滤波方法在抑制图像斑点噪声的同时,很好地保持了均匀区域的辐射特性,保持图像中的边缘以及细小纹理,且没有人为畸变。且本文算法的高频子带图像含有更为丰富的纹理,对于边缘特征的提取非常有益。

参考文献:

- [1] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1980, 2(2): 165-168.
- [2] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C. Adaptive noise smoothing filter for images with signal dependent noise[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(2): 165-177.
- [3] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise[J]. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(2): 157-166.
- [4] Lopes A, Nezry E, Touzi R. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture models in SAR images[C]// IGARSS'90, College Park, MD, 1990: 2409-2412.
- [5] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(6): 992-1000.
- [6] Gagnon L, Jouan A. Speckle filtering of SAR images-A comparative study between complex wavelet-based and standard filters[C]// SPIE, 1997: 80-91.
- [7] Argenti F, Alparone L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002, 40(11): 2363-2374.
- [8] Foucher S, Benie G B, Boucher J M. Multiscale MAP filtering of SAR images[J]. IEEE trans Image Processing, 2001, 10(1): 49-60.
- [9] Vidal-Pantaleoni A, Marti D, Ferrando M. An adaptive multiresolution method for speckle noise reduction in synthetic aperture radar images[C]// Hamburg, Germany, IGARSS, 1999.
- [10] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2002, 40(3): 721-727.
- [11] Sveinsson J R, Benediktsson J A. Speckle reduction and enhancement of SAR images in the wavelet domain[C]// IGARSS, Lincoln, NE, USA, 1996: 63-66.
- [12] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T. Despeckling SAR Images Using A Low-Complexity Wavelet Denoising Process[C]// IGARSS, 2002: 321-324.
- [13] Ferreira A F C, Fernandes D. Speckle filter for weibull-distributed SAR images [C]// IGARSS, 2000: 642-644.
- [14] Gnanadurai D, Sadaivam V. Undecimated wavelet based speckle reduction for SAR images[J]. Pattern

- Recognition Letters, 2005, 26(6): 793-800.
- [15] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2005, 14(12):2091-2106.
- [16] 酃苏丹, 张翠, 王正志, 等. 一种基于相关邻域模型的 SAR 图像迭代滤波方法[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(2): 179-184.
- Li Sudan, Zhang Cui, Wang Zhengzhi, et al. SAR image iterative filter method based on correlated neighbourhood model[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(2):179-184.
- [17] Eslami R, Radha H. Wavelet Based Contourlet Transform and It's Application to Image Coding[C] //IEEE International Conference on Image Processing. Singapore, IEEE,2004.
- [18] 曹兰英, 张昆辉, 夏良正. 基于多尺度小波变换的高斯混合模型 SAR 图像去噪[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(1): 44-47.
- Cao Lanying, Zhang Kunhui, Xia Liangzheng. SAR speckle reduction based on multi-scale wavelets and gauss mixture model[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2005, 20(1): 44-47.
- [19] 董巍. 改进的轮廓小波变换及其在图像去噪应用研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
- Dong Wei. An improved wavelet-based contourlet transform and research on its application to image denoising [D]. Xian: Xidian University, 2007: 15-42.
- [20] 柏延臣, 王劲峰, 朱彩英, 等. 基于小波分析的 SAR 图像斑点滤波及其性能比较评价[J]. 遥感学报, 2003,7(5):393-399.
- Bo Yan-chen, Wang Jin-feng, Zhu Cai-ying, et al. A wavelet-based filter for SAR speckle reduction and the comparative evaluation on its performance [J]. Journal of Remote Sensing,2003,7(5):393-399.
- [21] Ramchandran K, Vetterli M. Best wavelet packet bases in a rate-distortion sense [J]. IEEE Trans Image Processing,1993,2(2):160-175.
- [22] Nason G P, Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications [Z]. Wavelets and Statistics, Lecture Notes in Statistics, Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [23] Walker J S, Chen Y J. Image denoising using tree-based wavelet subband correlation and shrinkage[J]. Optical Engineering, 2000,39(11): 2900-2908.
- [24] 李旭超. 小波变换和马尔科夫随机场在图像降噪与分割中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- Li Xu-chao. The application research of wavelet transform and markov random field to image denoising and segmentation [D]. Hangzhou: Zhejiang university,2006:53-68.
- [25] 蔡超. 基于小波和偏微分方程的图像处理方法与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- Cai Chao. Wavelet and partial differential equation based image processing methods and their application [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2005: 122-131.
- [26] 李军侠. SAR 图像噪声抑制和局部特征提取[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
- Li Junxia. Speckle suppression of SAR images and extraction of local features[D]. Xian: Xidian University,2008.
- [27] 张晶晶, 方勇华. 基于 Contourlet 变换的遥感图像去噪新算法[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 462-466.
- Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel denoising method for remote sensing image based on contourlet transform [J]. ACTA OPTICA SINICA, 2008, 28(3): 462-466.
- [28] 赵艳飞. Contourlet 变换在图像处理中的应用研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2007.
- Zhao Yanfei. Application research of contourlet transform in image processing[D]. Hefei: Anhui University, 2007.
- [29] 曲长文, 何友, 刘卫华, 等. 框架理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009:249-251.
- Qu Changwen, He You, Liu Weihua et al. Frames theory and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:249-251.
- [30] 丁灿. 内波 SAR 图像特征自动检测技术[D]. 青岛: 海军潜艇学院, 2008.
- Ding Can. Auto-Detection technology of internal waves features of SAR image[D]. Qingdao: Navy submarine academy, 2008.

作者简介:丁灿(1983-),男,博士研究生,研究方向:SAR 图像特征提取及目标检测;曲长文(1963-),男,博士,教授,研究方向:电子对抗,信号处理,目标识别;杨俭(1982-),男,博士研究生,研究方向:SAR 信号目标检测。