

基于小波-Contourlet 变换与 Cycle Spinning 相结合的 SAR 图像去噪

刘帅奇 胡绍海 肖扬

(北京交通大学信息科学研究所, 北京 100044)

摘要: 由于合成孔径雷达(SAR)在农业、林业、水文、地矿、海洋、测绘等领域广泛应用, SAR 图像质量和视觉效果提升成为了各国学者研究的热点问题。SAR 图像的主要噪声源——相干斑噪声的抑制和去除显得越来越重要。本文通过分析了 SAR 图像的噪声成因以及其噪声模型。基于 SAR 图像的特性, 本文结合小波变换和 Contourlet 变换各自的优点, 提出了一种基于小波-轮廓波变换与图像循环平移结合的 SAR 图像去噪算法。本文所提出的算法不仅可以显著去除相干斑噪声, 提高图像的信噪比, 而且还具有平移不变性, 可明显改善图像的视觉效果。实验结果表明: 与单独使用小波变换去噪相比, 本文算法的信噪比提高 2 分贝; 与单独使用 Contourlet 变换去噪相比, 本文的算法去噪后的图像更平滑, 抑制了人造纹理产生, 视觉效果得到了明显的改善。

关键词: 小波-Contourlet 变换; 小波去噪; Contourlet 变换去噪; 合成孔径雷达图像去噪

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)06-0837-06

SAR Image De-noised Based on Wavelet-Contourlet Transform with Cycle Spinning

LIU Shuai-qi HU Shao-hai XIAO Yang

(Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: As the synthetic aperture radar (SAR) has been widely used in agriculture, forestry, hydrology, mining, marine, mapping and other fields, the method to improve the image quality and visual effect of the SAR image has become a hot research problem for the international scholars. The suppression and removal of the speckle of SAR image has been more and more important. This paper analyzes how the noises of the SAR image are generated and their models are appropriate for the characteristics of SAR images. Then based on the advantages of wavelet transform and the Contourlet transform, we proposed a SAR image de-noising algorithm, which is Wavelet-Contourlet Transform with Cycle Spinning de-noising algorithm. The proposed algorithm can significantly suppress the speckle noise and improve the SNR of the image, also have the character of translational invariance, greatly improve the visual effect. Compared with just using Wavelet transform, the experiment result shows that the proposed algorithm's SNR increased 2dB. The proposed algorithm for SAR image de-noising makes the SAR images to be smoother than Contourlet transform and to be of much fewer man-made textures, the visual effects of the SAR image after de-nosing have been significant improvements.

Key words: Wavelet-Contourlet Transform; Wavelet de-nosing; Contourlet de-nosing; SAR Image De-nosing

1 引言

合成孔径雷达是一种能够全天候、全天时产生高分辨率微波遥感图像的相干成像系统,同可见光相比它具有不受季节,天气,光照等恶劣条件限制,并且具有多波段、多极化、可变侧视角、穿透能力强等巨大优点,从而受到世界各国普遍重视,在民用和军事等众多

领域都有十分广泛的应用。

然而,由于相干成像机制,使图像内原本具有相同向后散射系数的均质区域表现出颗粒状噪声,这种噪声称为相干斑[1-3]。相干斑的存在大大的增加了了解译图像的复杂性,降低了图像分割、目标分类以及其他信息提取的有效性。因此对 SAR 图像的去噪主要着眼点在于抑制或者消除相干斑噪声。

由于 SAR 图像噪声的特殊性,所以不能按照传统的图像处理方法来处理 SAR 图像[2,3]. 近年来随着小波变换理论不断完善,其在图像处理领域的得到了广泛的应用. 很多学者将其应用到 SAR 图像去噪领域,但是,由一维小波通过张量积而形成的二维可分离小波变换只具有有限个变换方向而不能“最优”的表示含线或者面奇异的二维图像. 因此,Do M N 和 Vetterli M 又提出了一种能更好的表征二维图像各向异性特征的表达方法-Contourlet 变换[4,5]. 但是,在应用中发现此方法会出现人造纹理. 于是,有学者结合小波和轮廓波各自优点,提出了小波-轮廓波变换理论[6],该方法在图像去噪和增强等领域取得很好的效果. 但是,由于小波-Contourlet 变换不具有平移不变性,因此去噪后的图像也含有人造纹理,视觉效果相对较差. 本文结合小波-Contourlet 变换与 Cycle Spinning 方法提出了一种新的基于小波-Contourlet 变换的 SAR 图像去噪方法. 实现结果表明相比小波去噪方法提高了 SAR 图像去噪后的信噪比,相比 Contourlet 变换,视觉效果得到了明显的提升.

2 相干斑噪声的形成机理及模型

实际上在 SAR 图像的形成过程中并不仅仅包含一种噪声,它包括雷达系统本身引起的热噪声,天线引起的噪声和相干噪声三种噪声[2,3],本文仅仅对相干噪声的形成机理做一些分析,并建立噪声的模型.

由合成孔径雷达成像的原理可以知道,与雷达系统波长相比,任何 SAR 地面分辨单元都很大,所以,地面上每个分辨单元可以看成是由多个到雷达接收机的距离不同的散射点所组成的. 每个散射点产生的回波相干叠加,得到每个分辨单元总的回波信号为:

$$\begin{aligned} A(x, y)e^{i\phi(x, y)} &= A_R(x, y) + jA_j(x, y) \\ &= \sum_{k=1}^M A_k(x, y)e^{i\phi_k(x, y)} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, $A(x, y)$ 表示 SAR 图像中一个像素记录的回波的振幅, $A_R(x, y)$, $A_j(x, y)$ 分别表示回波信号的实部和虚部, $A_k(x, y)$ 和 $\phi_k(x, y)$ 分别表示第 k 个散射点的回波的振幅和相位. M 表示散射点的个数.

由于每个散射中心的回波都有独立的相位和振幅,因此总的回波信号的幅度和相位也是随机变化的. 因此,雷达在扫描本来均匀的地面区域时,得到的总的回波强度与子回波的平均强度之间存在偏差,在 SAR 图像中却出现了剧烈的灰度变化,有的分辨单元呈暗

点,有的分辨单元呈亮点,呈现出颗粒状起伏. 这些斑点其根源于雷达波的相干叠加,因此称为相干斑噪声.

由于一般情况下相干斑点噪声是完全发育的[7],由 Goodman 证明了完全发育的相干斑噪声是一种乘性噪声,其乘性模型是:

$$I(x, y) = R(x, y) * F(x, y) \quad (2)$$

式(2)中 (x, y) 表示分辨单元中心像素方位向和距离向的坐标,其中, $I(x, y)$ 表示被相干斑噪声污染的图像的强度, $R(x, y)$ 表示随机的地面目标的雷达散射特性,即实际上应该观察到的真实的地貌场景, $F(x, y)$ 表示由于衰落过程所引起的相干斑噪声过程,随机过程 $R(x, y)$ 和 $F(x, y)$ 是相互独立的,并且 $F(x, y)$ 是一个 Γ 分布,它具有二阶平稳性,均值为1,且方差与等效视数成反比.

3 小波-Contourlet 变换

SAR 图像斑点噪声处理有两大类方法,分别是在成像过程进行多视平滑性处理或在成像后的图像采用图像滤波[2,3]. 前一种方法最直接,在早期的 SAR 图像去噪中起了很大的作用,且具有良好的去噪效果,但是,该技术严重的降低了方位图像的空间分辨,因此,进入 80 年代以后,采用成像后的滤波技术去噪得到了广泛的应用,并且成为了这一领域主流的算法.

随着小波技术广泛应用,基于小波的斑点滤波方法被提了出来. 最直接的方法就是直接将图像利用小波变换分解为不同尺度的成分,去掉由斑点引起的小尺度成分,重建图像以此来完成 SAR 图像的去噪. 目前还有很多学者正在研究斑点对小波系数影响,以得到更好的去噪方法. 由于小波技术相对于傅立叶分析而言具有更好的时频特性,因此,去除斑点同时能够一定程度上保持边缘. 所以得到了学者们广泛的关注.

虽然,对一维分段光滑函数有良好的非线性近似效果,但是,小波的支撑区间为不同尺寸大小的正方形,随着分辨率变细,小波只能用点来逼近奇异曲线,不能最优地表示含线或者面的高维函数,也就意味着二维小波不能更稀疏地表示原图像函数. 并且,二维小波只有有限个方向[1-5],不能有效地“捕获”图像方向信息.

为了更有效地“捕获”图像方向信息,Do M N 和 Vetterli M 又提出了一种表征二维图像各向异性特征的更好的表达方法—Contourlet 变换[5-10],也称为塔形方向滤波器组(Pyramidal directional filter bank, PDFB),

其主要目的是为了获得含有线和面奇异的图像的稀疏表达。Contourlet 不但有足够的方向性,还保持了小波的多尺度特性、时频局部特性。

由于 Contourlet 具有非常好的非线性逼近性能,能将更多的系数集中到更少的 Contourlet 系数中,所以能够对图像进行更稀疏的表示,如图 1 所示。

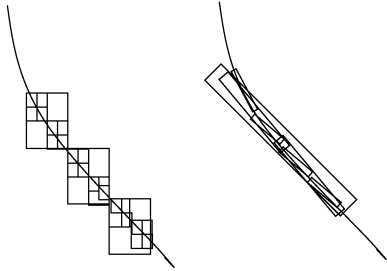


图 1 小波和 Contourlet 对曲线的描述

Fig. 1 Wavelet and Contourlet transform express the curve

Contourlet 变换是由塔形方向滤波器组 (PDFB) 把图像分解成各个尺度上的方向子带,如图 2 所示. 它有分两大部分实现:第一部分用 LP (Laplacian pyramid) 变换对图像进行多尺度分解以“捕获”奇异点,也称为子带分解部分,详细原理见图 3;第二部分由方向滤波器组 (DFB) 将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数,也称为方向变换部分,详细原理见图 4。Contourlet 变换的最终结果是用类似线段的基结构来逼近原图像。LP 分解和 DFB 都具有完全重构性,因此能由变换系数得到完整图像。

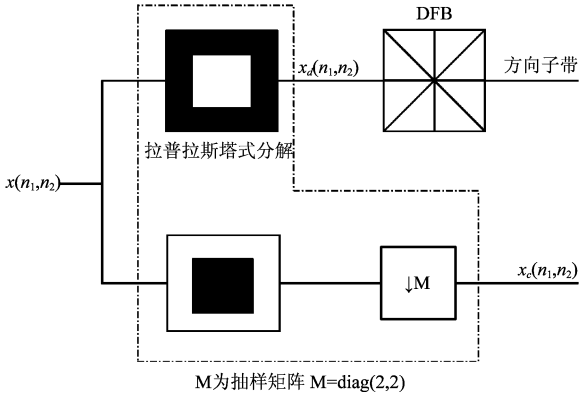


图 2 Contourlet 变换示意图

Fig. 2 Contourlet transform Schematic diagram

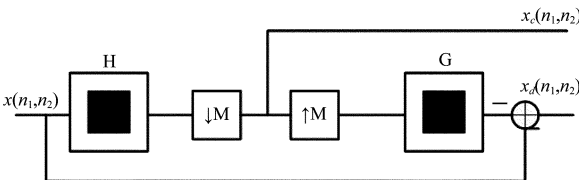


图 3 LP 变换示意图

Fig. 3 LP transform Schematic diagram

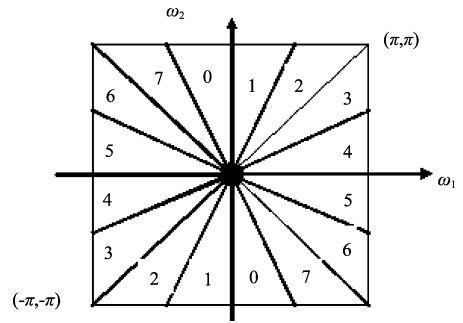


图 4 DFB 变换示意图

Fig. 4 DFB transform Schematic diagram

虽然 Contourlet 变换是一种灵活的多分辨率、多方向性的变换,允许每个尺度上有不同数目的方向,但是,由于在 LP 和 DFB 两个阶段都进行了下采样操作,使得图像 Contourlet 系数的冗余度大大降低(冗余度仅为 1.33),从而使得该变换缺乏平移不变性,从而在图像去噪时会出现明显的振铃效应,导致图像失真。Ramin Eslami 和 Hayder Radha 于 2004 年提出小波-Contourlet 变换 [8, 9],他们在 Contourlet 变换的基础上,使用小波变换代替 LP 变换做子带分解。小波变换每一级都将上一级的低频分量再分解为低频和 LH、HL、HH 共 3 个高频部分。然后,每个高频子带被方向滤波器在 2N 个方向上分解,将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数。

现在介绍一下小波-Contourlet 滤波器的构造,先来看一下 DFB 的构造情况,对于 l 级的方向滤波器组,有 2^l 个等价分析滤波器传递函数 H_k^{(l)}(z) 和综合滤波器传递函数 G_k^{(l)}(z) (其中 0 ≤ k < 2^l, z = (z_1, z_2)^T) 以及下采样矩阵 S_k^{(l)} (0 ≤ k < 2^l),其中 S_k^{(l)} 定义为 [5]:

$$S_k^{(l)} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2^{l-1} \end{pmatrix}, & 0 \leq k < 2^{l-1} \\ \begin{pmatrix} 2^{l-1} & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, & 2^{l-1} \leq k < 2^l \end{cases} \quad (3)$$

那么, {g_k^{(l)}(n - S_k^{(l)}m)} (0 ≤ k < 2^l, m ∈ Z^2, n ∈ Z^2) 是综合滤波器 G_k^{(l)}(z) 的脉冲响应函数。由于该滤波器是完全重构的,所以二维输入信号 x(n) (其中 n = (n_1, n_2)^T) 和输出信号 x̂(n) (其中 n = (n_1, n_2)^T) 满足如下关系:

$$\hat{x}(n) = x(n) = \sum_{k=0}^{2^l-1} \sum_{m \in Z^2} y_k(m) g_k^{(l)}(n - S_k^{(l)}m) \quad (4)$$

式(4)中: y_k(m) = <x(n), h_k^{(l)}(S_k^{(l)}m - n)>, 其中 h_k^{(l)}(n) 是分解滤波器 H_k^{(l)}(z) 的脉冲响应函数, g_k^{(l)} 是滤波器 G_k^{(l)}(z) 的脉冲响应函数, <·> 表示信号的内积

运算。

注意,实际上 $y_k(m)$ 为 $l(k)$ 子带上做 DFB 分解后的信号。

在小波-Contourlet 变换中,先进行小波分解然后再进行方向滤波器分解,假设在尺度 j 下,分解二维信号得到的高频部分的小波空间分别为 $W_{j,HL}$ 、 $W_{j,HH}$ 和 $W_{j,LH}$,且它们的基函数分别为 $\Psi_{j,HL}(n)$ 、 $\Psi_{j,HH}(n)$ 和 $\Psi_{j,LH}(n)$,则尺度空间 V_j 与小波空间 W_j 的关系为

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j \quad (5)$$

$$W_j = W_{j,HL} \oplus W_{j,HH} \oplus W_{j,LH} \quad (6)$$

式(6)中 \oplus 表示空间直和。然后,对此小波空间都采用 l_j 级的方向滤波,得到第 k 个方向子带空间分别记为 $W_{j,HL,k}^{(l_j)}$ 、 $W_{j,HH,k}^{(l_j)}$ 和 $W_{j,LH,k}^{(l_j)}$ ($0 \leq k < 2^{l_j}$),则被 DFB 分解前的小波空间可以表示为:

$$W_{j,HL} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j-1}} W_{j,HL,k}^{(l_j)} \quad (7)$$

$$W_{j,HH} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j-1}} W_{j,HH,k}^{(l_j)}$$

$$W_{j,LH} = \bigoplus_{k=0}^{2^{l_j-1}} W_{j,LH,k}^{(l_j)}$$

由此,经过小波-Contourlet 变换,在经过尺度 j 的小波滤波和 DFB 方向滤波后,方向子带空间 $W_{j,HL,k}^{(l_j)}$ 、 $W_{j,HH,k}^{(l_j)}$ 和 $W_{j,LH,k}^{(l_j)}$ 的基函数分别为:

$$\begin{aligned} \eta_{j,HL,k}^{(l_j)}(n) &= \sum_{m \in Z^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)}m) \Psi_{j,HL}(m) \\ \eta_{j,HH,k}^{(l_j)}(n) &= \sum_{m \in Z^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)}m) \Psi_{j,HH}(m) \\ \eta_{j,LH,k}^{(l_j)}(n) &= \sum_{m \in Z^2} g_k^{(l_j)}(n - S_k^{(l_j)}m) \Psi_{j,LH}(m) \end{aligned} \quad (8)$$

因此,小波-Contourlet 变换比小波变换、Contourlet 变换能更稀疏地表达图像,获得图像结构特征。

4 Cycle Spinning 算法

由于 Contourlet 变换缺乏平移不变性,那么小波-Contourlet 也是缺乏平移不变性的,信号中的不连续点的领域在处理过程中会产生伪吉布斯现象,为了解决这个问题 Coifman 等提出了 Cycle Spinning 算法[10, 11],对图像数据进行和列的循环平移,然后将平移后的图像分别经过小波-Contourlet 变换去噪,然后再对去噪后的图像进行反平移,如式(9)所示。最后将多次平移处理后的结果平均,得到的图像伪吉布斯现象得到了明显的抑制。如式(10)所示:

$$\hat{s}_{i,j} = S_{-i,-j}(T^{-1}(\theta(T(S_{i,j}(f(x,y)))))) \quad (9)$$

$$\hat{s} = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{i=1, j=1}^{N_1, N_2} \hat{s}_{i,j} \quad (10)$$

其中 $f(x,y)$ 表示图像在 (x,y) 位置的灰度值, N_1, N_2 分别表示行和列方向上的最大平移量, S 为循环平移算子,下标 i 和 j 以及 i 和 j 分别为行和列方向上的平移量, T 为变换算子, T^{-1} 为逆变换算子, θ 为阈值算子。

5 基于小波-Contourlet 变换的 SAR 图像去噪

本文结合小波-Contourlet 变换和 Cycle Spinning 的优点,对 SAR 图像进行去噪处理。具体的算法如下:

(1) 先将原始的图像中加入乘性噪声。

(2) 对含噪图像做循环平移,本文中行列分别进行 8 次平移,得到 64 组图像。

(3) 分别对每一幅图像做小波-Contourlet 变换,得到不同子带不同方向上的变换系数。

(4) 采用软阈值法进行去噪处理。

(5) 对去噪后的图像进行反变换和反平移,得到 64 幅结果图像。

(6) 取 64 幅图像的平均值,得到最终的融合图像。

6 实验结果与分析

为了验证本文算法的可靠性与有效性,我们对一幅原始图像加噪,分别对噪声图像进行小波变换软阈值去噪、Contourlet 变换软阈值去噪、小波加上 Cycle Spinning 算法软阈值去噪、Contourlet 变换加上 Cycle Spinning 算法软阈值去噪和本文的小波-Contourlet 加上 Cycle Spinning 算法软阈值去噪,对去噪后的图像进行比较。利用中科院拍摄的济南市的 SAR 图像进行试验,图 5 和图 6 给出了实验结果,表 1 是由各个去噪方法去噪后的图像的信噪比。

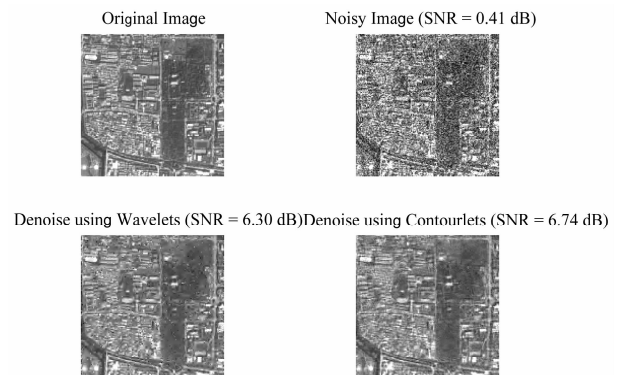


图5 使用小波和轮廓波去噪的图像

Fig.5 de-noised by Wavelets and Contourlet

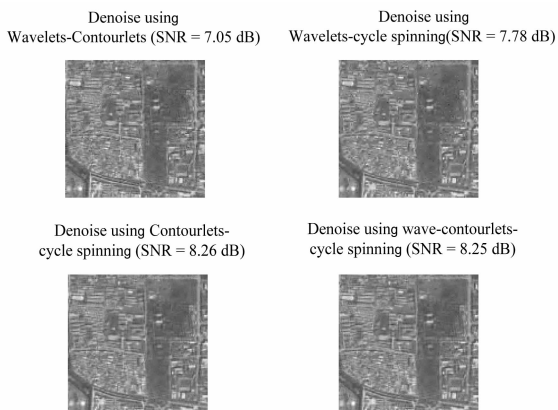


图 6 使用各种去噪方法去噪后的图像

Fig. 6 the results by each de-noising method

从图 5 的实验结果可以看到轮廓波去噪后的图像具有更好的视觉效果和更高的信噪比,图 5 的第 3 幅图是用小波进行去噪的结果,可以看到,在图 5 中,还有一些斑点噪声,细节也不如最后一幅图显示的清楚。

图 6 中使用的方法从左到右从上到下,依次是小波-Contourlets 变换去噪、小波变换+Cycle Spinning 去噪、Contourlets 变换+ Cycle Spinning 去噪和我们使用的小波-Contourlets 变换+Cycle Spinning 去噪法。比较图 6 中最后两幅图,可以看到在信噪比差不多的情况下,本文的方法比前一种方法有更好的视觉效果,显示了更多的图像细节。而和小波-Contourlets 变换去噪和小波变换+Cycle Spinning 去噪比起来,不仅信噪比有了很大的提高,图像的分辨率显著提高了,并且少了很多人造纹理。所以,可以得出结论,本文提到的小波-Contourlets 变换+Cycle Spinning 去噪法在 SAR 图像去噪中表现的最为优秀。

为了测试算法的真实效果,我们又将算法运用到原始的 SAR 图像上进行相干斑去噪,简便起见,仅仅使用图 6 所示的四种算法对一幅田地的原始图像(如图 7 所示)进行去噪。



图 7 田地的原始 SAR 图像

Fig. 7 the original image of farmland

对图 7 去噪后得到如图 8 所示的去噪后的图像,为了比较算法的效果,我们采用峰值信噪比(PSNR)来衡量图像的去噪效果,如表 2 所示。

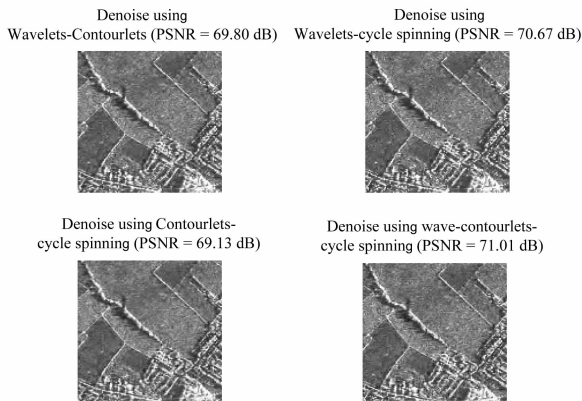


图 8 对田地 SAR 图像去噪后的图像

Fig. 8 the results by each de-noising method for the SAR image of farmland

图 8 中使用的方法从左到右从上到下,依次是小波-Contourlets 变换去噪、小波变换+Cycle Spinning 去噪、Contourlets 变换+ Cycle Spinning 去噪和我们使用的小波-Contourlets 变换+Cycle Spinning 去噪法。从图 8 的实验结果分析,可以得到与图 7 实验分析类似的结论,与小波-Contourlets 变换去噪和 Contourlets 变换+ Cycle Spinning 去噪相比,本文的算法有更高的 PSNR 值,而且在与小波变换+Cycle Spinning 去噪相比,本文提出的算法不仅在 PSNR 上有所提高,而且去除了相干斑噪声效果大大的得到了改善,有更多的图像细节得到了保留。

表 1 所示的图表是图 6 中各种去噪函数对加噪后的图像进行去噪后的信噪比,表 2 是图 8 中的各种去噪算法对原始含有相干噪声进行去噪后的峰值信噪比。从表 1 和表 2 所示的各种去噪方法的信噪比和峰值信噪比分析,本文所使用方法也是一种优良的方法,因此综合考虑,本文提到的方法是非常适用的 SAR 图像去噪方法。

表 1 各种去噪方法的信噪比

Tab. 1 the SNR of all of de-nosing method

去噪方法	小波变换去噪	轮廓波去噪	小波-Contourlets 变换去噪	小波变换+Cycle Spinning 去噪	Contourlets 变换+ Cycle Spinning 去噪	小波-Contourlets 变换+Cycle Spinning 去噪法
信噪比 (dB)	6.30	6.74	7.05	7.78	8.26	8.25

表2 对原始 SAR 图像去噪的峰值信噪比

Tab.2 the PSNR of all of de-nosing method for original image of farmland

去噪方法	小波 -Contourlets 变换 去噪	小波 变换 +Cycle Spinning 去噪	Contourlets 变换 + Cycle Spinning 去噪	小波 -Contourlets 变换 +Cycle Spinning 去噪法
PSNR (dB)	69.80	70.67	69.13	71.01

7 结束语

本文提出一种基于小波-Contourlet 变换的 SAR 图像去噪算法,该算法使用了 Cycle Spinning 使本算法具有平移不变性,在 SAR 去噪过程中起到去除人造纹理的作用.实验结果表明所提出的算法可有效地保留了边缘细节和纹理特征,得到很好的视觉效果.但是,本文所提出的算法也还有不完善的地方:信噪比还可进一步提高,运行时间稍长,在噪声的方差较大时,算法的平移不变性会受到很大影响.所以下一步的工作将在算法的计算效率和图像去噪的平移不变性方面来进行研究。

参考文献

- [1] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. Journal Optical Society America, 1976, 6(11): 1145-1150.
- [2] Liu Z X, Hu S H, Xiao Y, Qu G Z, Kim K S, SAR image target extraction based on 2-D leapfrog filtering, Proceedings of 2010 IEEE 10th International Conference on Signal Processing, (ICSP2010), 2010, pp. 1943-1946.
- [3] 肖扬, 张颖康, 一种基于二维混合变换的 SAR 回波信号去噪预处理方法, 中国国家知识产权局, 申请号: 2009100083345.7, 申请日期: 2009-05-04.
Xiao Yang, Zhang Yingkang, Hybrid transform based on two-dimensional SAR echo signal denoising preprocessing method. State Intellectual Property Office of the People's Republic of China, Patent Application No. 2009100083345.7, Date, 2009-05-04. (in Chinese)
- [4] Do M N. Directional multiresolution image representation [D]. PhD thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2001.
- [5] Do M N, Vetterli M. Contourlets: A directional multiresolution image representation[C]. Proc of IEEE International Conference on Image Processing. Rochester, NY: 2002. 357-360.

- [6] 梁栋,李瑶,沈敏,等.一种基于小波-Contourlet 变换的多聚焦图像融合算法[J].电子学报,2007,35(2):320-322.
LIANG Dong, LI Yao, SHEN Min, GAO Qing-wei, BAO Wen-xia. An Algorithm for Multi-Focus Image Fusion Using Wavelet Based Contourlet Transform [J]. Chinese Journal Of Electronics, 2007, 35(2):320-322. (in Chinese)
- [7] J W Goodman. Some fundamental properties of speckle [J]. J. Opt. Soc. Am, 1976, 66(11):1145-1150.
- [8] Cunha A L, Zhou J P, and Do M N. The nonsubsampling Contourlet transform: Theory, design and application. IEEE Trans. on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [9] Eslami R, Radha H. Wavelet based Contourlet Transform and it's Application to Image Coding[C]. Singapore: IEEE International Conference on Image Processing, 2004:3189-3192.
- [10] Coifman R R, Donoho D L. Translation invariant denoising [C]. Wavelets and Statistics, Springer Lecture Notes in Statistics 103. New York: Springer-Verlag. 1995. pp. 125-150.
- [11] Eslami R, Radha H. The contourlet transform for image de-noising using cycle spinning [C]. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Pacific Grove, USA, 2003, pp. 1982-1986.

作者简介



刘帅奇(1986-),男,河北石家庄人,北京交通大学信息科学研究所博士生,主要研究方向,人机交互,信号处理,SAR,雷达成像,图像处理,移动终端。
E-mail:shdkj-1918@163.com



胡绍海(1964-),男,江西人,博士,北京交通大学信息科学研究所教授,硕士生导师,主要研究方向为信号检测与处理、IP网络与多媒体通信、人工神经网络、虚拟仪器测试、图像处理与 DSP 应用等。
E-mail:shh@bjtu.edu.cn



肖扬(1955-),男,北京人,博士,北京交通大学信息科学研究所教授,博士生导师,主要研究方向为高阶谱分析与非线性信号处理,雷达信号处理,MIMO,多维信号处理,空时信息处理,智能天线信息处理,Turbo 信息处理,智能交通信息处理,超声波三维信息处理和无线感知等。
E-mail:yxiao@center.njtu.edu.cn