

文章编号: 1001-9014(2008)05-0066-06

基于 Contourlet 域 HMT 模型的 SAR 图像相干斑抑制

沙宇恒, 丛琳, 孙强, 焦李成

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

摘要: 将 Contourlet 变换用于 SAR 图像的统计特性研究中. 基于 Contourlet 域隐马尔可夫树模型 (CHMT), 从图像复原的角度出发, 结合最小均方误差估计和 Bayes 估计给出一种 SAR 图像相干斑抑制的新方法. 并给出基于拉普拉斯金字塔算法 (LP) 分解的斑点方差估计方法. 实验中与小波域 HMT 算法进行了比较, 本文方法在方向信息的保留和斑点的抑制上均有明显改进.

关键词: SAR 图像处理; SAR 图像相干斑抑制; Contourlet 域; HMT 模型; 几何多尺度分析

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

SAR IMAGE DESPECKLING BASED ON CONTOURLET DOMAIN HIDDEN MARKOV TREES MODEL

SHA Yu-Heng, CONG Lin, SUN Qiang, JIAO Li-Cheng

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

Abstract: Contourlet transform was introduced in the SAR image statistical property research work. Based on Contourlet domain Hidden Markov Trees Model, starting from image restore methods, a novel SAR image despeckling method was given. This method combined the SAR image despeckling technology with minimum mean square error (MMSE) and Bayes estimate. A new speckle variation estimate method was given based on Laplacian pyramid (LP). The results comparison with wavelet domain method were given. Experimental results show that the method represents better performance in speckle reduction and edges information detection.

Key words: SAR image processing; SAR image despeckling; Contourlet domain; hidden Markov trees (HMT) models; geometry multi-scale analysis

引言

SAR 图像的相干斑属于乘性噪声, 斑点噪声通过对数变换其均值并不等于零, 经典的阈值估计算法大都基于高斯白噪声, 直接将这种阈值思想应用到对数变换后的 SAR 图像中是缺乏理论依据的^[1,2], 并且还需要做一些修正来避免重构图像中出现的误差. 很多学者将统计分析和回归分析引入到 SAR 图像处理领域^[3-5], 仅通过对灰度信息进行统计建模对 SAR 图像来说是远远不够的, 不能够充分体现其多尺度多分辨等特性. 基于小波域统计特性的方法, 利用统计决策估计 SAR 图像的分布特性^[6], 不但避免了对数变换和阈值估计, 而且在多尺度多分辨的统计模型下分析斑点分布特性, 更好

地保持了图像的细节以及轮廓特征. 遗憾的是小波变换对含点状奇异的目标函数是最优的基, 在分析这类目标时小波系数是稀疏的, 但对具有线状奇异的函数, 小波系数则不再稀疏^[7]. 这就产生了新的问题, 如何在保持多尺度、多分辨的前提下更好地捕获和保留方向性边缘信息.

图像几何多尺度分析^[7]的发展给整个图像处理领域带来了新的挑战和生机, 在 SAR 图像处理中也得到了成功应用^[8]. Contourlet 变换^[9]是一种多分辨的、局域的、方向的图像表示方法, 继承了 Curvelet 变换的各向异性的多尺度关系, 克服了脊波的非线性逼近误差衰减阶问题和 Curvelet 中 Randon 变换的冗余度问题. 隐马尔可夫树模型作为一种多尺度统计模型, 可以充分地利用尺度间的参数相关性, 利

收稿日期: 2008-06-21, 修回日期: 2008-12-18

Received date: 2008-06-21, revised date: 2008-12-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(60702062), “十一五”预研项目(51307040103), “863”计划项目(2007AA12Z136)和(2007AA12Z223)

作者简介: 沙宇恒(1980-), 男, 黑龙江大庆人, 博士研究生, 主要从事图像的多尺度几何分析及其参数统计模型和 SAR 图像处理和智能目标识别的研究.

用父子代的传递关系充分捕获尺度间相关性信息,从而有效地估计出状态转移概率,利用统计建模更为有效地刻画了图像高维奇异性信息. 本文在 Contourlet 几何多尺度框架下,分析了 SAR 图像几何多尺度统计特性,结合 Contourlet 域隐马尔可夫树模型^[10]给出一种新的 SAR 图像斑点抑制方法. 利用贝叶斯准则和最小均方估计给出一种新的收缩算子,根据相干斑的分布特性,给出一种基于 LP 分解的相干斑方差估计算法. 实验结果证明了该方法是可行有效的.

1 SAR 图像 Contourlet 域统计分析

1.1 SAR 图像统计特性

下面介绍强度和幅度 SAR 图像的统计特性. 令 X 为观测到的原始信号(强度或幅度), Y 是无噪信号, F 为斑点噪声,由于斑点噪声的乘性特性,观测信号可以表示为 $X = Y \cdot F$, 下面回顾一下 L 视 SAR 图像强度 I 的条件概率密度函数 pdf^[1,3]

$$P_{I|Y}(x|y) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{y}\right)^L x^{L-1} e^{-Lx/y}, \quad (1)$$

其中, x 是观测到的强度值, y 是对应的实际强度值, $\Gamma(g)$ 是 Gamma 函数, 令幅度 A 等于 I 的平方根, 其 pdf 分布如下:

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

需要指出, 当 $L=1$ 时式(1)、(2)对应的是单视 SAR 图像的统计分布(强度, 幅度), 此时分别服从指数分布和瑞利分布. 在 L 视 SAR 图像中, 斑点噪声 F 服从均值为 1 的参数为 L 的 Gamma 分布, 其 pdf 由下式给出

$$P_F(f) = \frac{L^L f^{L-1} e^{-Lf}}{\Gamma(L)}, \quad f \geq 0, \quad (3)$$

其中, f 是随机的斑点噪声变量. 当 $L=1$ 时, 式(3)简化成为均值为 1 的指数分布. 在 L 视 SAR 图像幅度中, 斑点噪声 F 的分布是离散形式的, 但是均值等于 1 方差等于 $(4/\pi - 1)/L$.

1.2 SAR 图像 Contourlet 域统计建模

Contourlet 具有多方向、多尺度以及多分辨等优良特性^[9,10], 可以充分捕获 SAR 图像中具有的方向性的边缘以及纹理信息, 在不同尺度下检测了 SAR 图像的方向细节以及背景轮廓信息. 对 SAR 图像的 Contourlet 系数进行多尺度的统计建模, 可以更有效地描述其尺度间的传递特性, 充分地体现方向以及多尺度特性. 下面给出一幅 SAR 图像单方向子代的

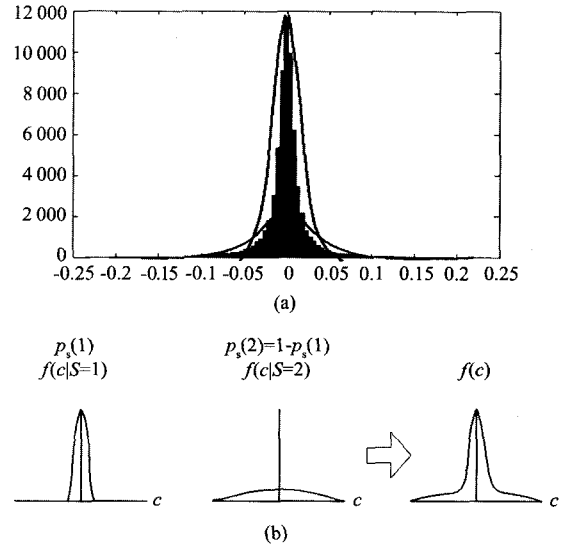


图 1 SAR 图像 Contourlet 系数逼近, (a) SAR 图像的 Contourlet 单方向子带系数直方图, (b) 两状态高斯混合模型对 SAR 图像 Contourlet 系数分布的逼近

Fig. 1 SAR image Contourlet approximate, (a) mono-directional contourlet coefficients histogram of SAR image, (b) two-state, Gaussian mixture model for Contourlet coefficients of SAR images

Contourlet 系数的分布直方图和 Contourlet 系数的两状态高斯混合逼近.

由图 1(a) 可知, SAR 图像在 Contourlet 单方向子代的系数分布边缘轮廓表现为高尖峰和重拖尾的非高斯分布, 说明 Contourlet 变换在对 SAR 图像中的高维奇异性信息表示的系数是稀疏的, 大多数的系数接近于零. 峰度(kurtosis)是统计分析中常用的一个概念, 通过对峰度的计算和分析可以区分不同的分布模型和判定分布统计特性. 图 1(a) 中系数分布的峰度(kurtosis)为 21.0335, 远远大于高斯分布的峰度 3.

文献[10]中根据邻域的相关熵等理论分析了 Contourlet 系数的尺度间和方向间的依赖性, 对于一幅自然图像, 其 Contourlet 变换并不能完全做到去相关. 换言之, 系数之间仍残存着一定的相关性结构, 如何有效地对这些结构做出统计性的描述是变换域统计信号和图像处理要完成的核心问题. 直接对这种分布的数据进行建模是非常困难的, 这里我们可以利用图 1 中轮廓线所示的两个边缘高斯分布的函数来逼近该分布, 即为两状态的高斯混合分布(GMM). 记单方向子代上的两状态的高斯混合模型逼近单个 Contourlet 系数的概率分布 $f(c)$, 可以表示如下式:

$$f(c) = \sum_{m=1,2} p_s(m) f(c/S = m) \quad (4)$$

其中, $\sum_{m=1,2} p_s(m) = 1$, S 表示控制系数的大小且不可观测的隐状态变量. $S = m, m = 1, 2$ 分别对应于系数为小值或大值时的隐状态标识.

单方向子代上混合高斯模型是一种有效的逼近和统计分析工具,如图 1(b)所示,在多方向多尺度上利用隐马尔可夫树模型(HMT)可以捕捉尺度间的状态传递概率,故 Contourlet 的 HMT 模型可以充分捕获图像的多方向、多尺度、多分辨以及尺度间的统计特性.下面给出四叉树结构的两种不同的父子系数对应关系.

图 2 中(a)为隐状态的四叉树结构,其中黑点表示 Contourlet 系数,白点表示不可观测的隐状态,连线表示尺度间对应的四叉树关系.(b)和(c)为 Contourlet 的尺度间可能存在的父子系数对应关系.

在 CHMT 模型中, Contourlet 系数 $C_{j,i}$ 在给定其状态 $S_{j,i}$ 的条件下独立于其它系数, j 代表尺度, i 代表方向. 因此一个两状态的 CHMT 模型参数设置如下:

- (1) $p_{S_0}(k), k = 0, 1$: 根节点 S_0 的状态概率;
- (2) $e_{j,j-1}^{k,l} = p_{S_j/S_{j-1}}(S_j = k/S_{j-1} = l), j = 0, L, J - 1$ 且 $k, l = 0, 1$: 父节点状态为 l 的条件下子节点状态为 k 的转移概率;
- (3) $\mu_{j,k}, \sigma_{j,k}^2$: 节点状态为 k 时的均值和方差.

可以将上面的模型参数合成一个参数向量 Θ , 然后可用最大期望(EM)算法通过训练得到.

2 SAR 图像的贝叶斯 Contourlet 估计

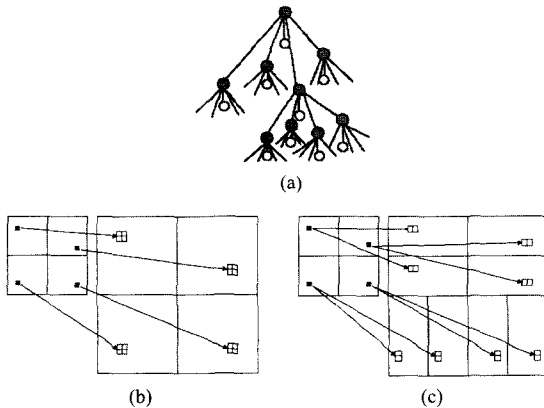


图 2 Contourlet 域 HMT 模型中的父子代对应关系(a)隐状态的四叉树结构,(b)CHMT 模型树的单方向传递,(c)CHMT 模型树的多方向传递

Fig. 2 Parent-children relationship for a possible contourlet decomposition, (a) quad-tree structure of hidden state, (b) mono-direction relationship, (c) multi-direction relationship

2.1 SAR 图像贝叶斯最小均方估计

SAR 图像的乘性模型可以表示成如下形式:

$$X = Y \cdot F \quad (5)$$

其中, Y 是无噪信号, X 是观测到的原始信号, F 是规范化的相干斑随机变量, 其均值为 1. SAR 图像有两种产生形式: 强度和幅度. 在强度格式时, F 服从 Gamma 分布, 然而在振幅格式时它服从瑞利概率密度分布函数^[1,3]. 简单对 SAR 图像进行对数变换, 并不能得到零均值的高斯分布, 因此不能直接引用经典的阈值估计算法进行滤波. 我们将上式简化成如下的简单的加性模式:

$$X = Y + Y(F - 1) \quad (6)$$

其中, $(F - 1)$ 是零均值的随机变量, $Y(F - 1)$ 是与未知无噪信号 Y 相关的并依赖于原始信号的噪声. 在类似线性变换中, 乘性的斑点噪声无需进行对数变换就可以转换成加性噪声来处理^[3], 故 SAR 图像的 Contourlet 变换可以表示成如下形式:

$$\begin{aligned} C_X &= C[X] = C[YZ] = C[Y + Y(Z - 1)] \\ &= C[Y] + C[Y(Z - 1)] = C_Y + C_B \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $C[\cdot]$ 表示 Contourlet 系数, C_B 是加性的依赖于信号的噪声等于 $C[Y(Z - 1)]$. 无噪系数 C_Y 的收缩估计可以近似表示为 $C_Y = \eta C_X$, 其中 η 为收缩算子, 其值在零周围变化. 则需要估计的无噪信号的 Contourlet 系数可以表示为 $\hat{C}_Y = \max(0, \eta) C_X$, 根据最小均方误差准则, 最优的收缩算子 η' 可以通过最小化 \hat{C}_Y 和 C_Y 的均方误差得到:

$$\eta' = \arg \min_{\eta} E[(\hat{C}_Y - C_Y)^2] \quad (8)$$

上式的最小均方误差解可以表示为:

$$\eta' = \frac{E[C_X^2] - E[C_X C_B]}{E[C_X^2]} \quad (9)$$

为了得到 η' , 需要求出上式中所有的未知量. 由于噪声系数 C_B 依赖于 C_X , 所以很难精确地估计出 $E[C_X C_B]$. 为了解决算法复杂度问题, Dai 等人提出一种基于高斯混合模型的小波系数收缩算子^[2], 并证明其满足最小均方准则. 下面我们给出基于 Contourlet 域 HMT 模型的系数收缩算子

$$\hat{C}_Y = \sum_{k=0,1} p(S = k | c_X) \frac{\sigma_{c_X}^2 - \sigma_{c_B}^2}{\sigma_{c_X}^2} C_X \quad (10)$$

其中, $\sigma_{c_X}^2$ 是含噪系数 C_X 在状态 S 下的方差, $p(S = k | c_X)$ 由贝叶斯公式计算

$$p(S = k | c_X) = \frac{p(c_X | S = k) p(S = k)}{p(c_X)} \quad (11)$$

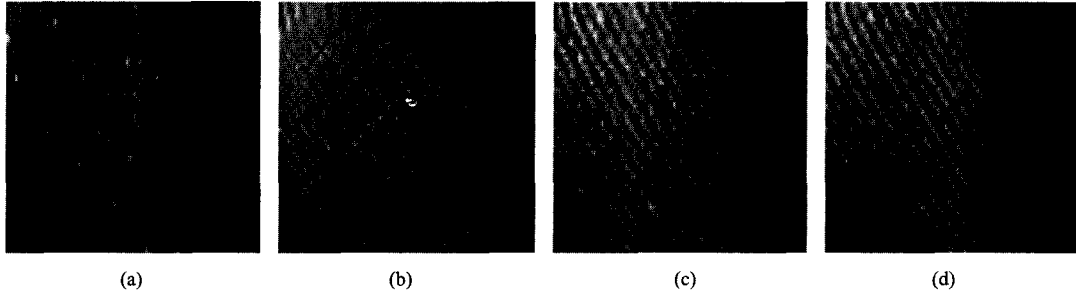


图3 不同方法局部放大结果比较

Fig.3 Comparison of local zoom in of varied methods(a)Wavelet Thresh,(b)Contourlet Thresh,(c)Wavelet HMT,(d)Contourlet HMT

现在问题转化为如何计算式(11)中的各个参数,其中 $\sum_{k=0,1} p(S = k | c_X)$ 是计算 CHMT 模型的一个中间结果,可以通过 EM 算法来计算, $\sigma_{c_X}^2$ 可以很容易地得到,关键问题是如何估计斑点噪声部分的方差 $\sigma_{c_B}^2$,下面我们给出详细的估计算法.

2.2 基于 LP 分解的相干斑统计估计

小波变换可以看作通过低通和高通滤波器来分别实现尺度分解和奇异性信息检测^[2],在 Contourlet 中 LP 分解用于捕获点状奇异性信息,方向滤波器组(DFB)分解再继续检测高维的线状信息^[9],基于 Contourlet 和 SAR 图像的统计特性,由文献[1~3]中所阐述的 SAR 图像统计特性有下式:

$$\sigma_{c_B}^2 = \Psi_j \mu_Y^2 C_F^2 (1 + C_Y^2) \quad (12)$$

其中, $\mu_Y = E[Y]$, 并且

$$C_Y^2 = \frac{C_{c_X}^2 - \Psi_j C_F^2}{\Psi_j (1 + C_F^2)} \quad (13)$$

含噪的 Contourlet 系数的规范化标准差等于 $C_{c_X} = \sigma_{c_X} / \mu_X$ ^[2],对于规范化的斑点噪声 F 有, $E[X] = E[Y]$, 带入式(13),则有

$$\sigma_{c_B}^2 = \frac{\Psi_j \mu_X^2 + \sigma_{c_X}^2}{1 + C_F^2} C_F^2 \quad (14)$$

其中, $\mu_X = E[X]$,对于强度 SAR 其规范化的标准差 $C_F = \sqrt{1/L}$,对幅度 SAR 有 $C_F = \sqrt{(4\pi - 1)/L}$ ($L \geq 1$ 为 SAR 图像的视数),并且 Ψ_j 定义如下:

$$\Psi_j = \left(\sum_k (h_k)^2 \right) \left(\sum_l (g_l)^2 \right)^{2(j-1)} \quad (15)$$

其中, h 和 g 分别是在尺度 j 下 LP 分解对应的高通和低通滤波器.

3 实验结果

为充分说明式(11)的有效性,我们首先给出已知噪声方差的 Barbara 图像的去对比结果,此时不需要式(14)中的相干斑方差估计方法,实验中小波

表1 不同方法的峰值信噪比(PSNR)比较

Noise Level σ	Noisy Image	Wavelet Thresh.	Contourlet Thresh.	Wavelet HMT	Contourlet HMT
20	22.1108	25.1548	25.7455	27.5291	27.9610
30	18.5902	23.2779	23.7993	25.4461	25.8226
40	16.1025	22.2672	22.5135	24.0154	24.3089

选择 db4, Contourlet 分解选择‘9~7’塔形分解和方向滤波器组,分解四层,细尺度两层选择四个方向,粗尺度两层选择八个方向,并利用图2(c)中的多尺度对应关系,阈值选择利用 Donoho 给出的经典硬阈值.

由表1可知,本文方法的 PSNR 有明显改进,下面给出 $\sigma = 30$ 时的局部放大图.

由图3可以明显看出,在进行阈值操作时 Contourlet 对方向信息表现出了超越小波的性能,但阈值去噪的思想仅依赖于变换域系数对原图的去相关性和奇异检测性,并没有考虑到系数的尺度间传递特性,在去噪结果中容易出现划痕现象.基于变换域多尺度模型的算法可以充分利用系数间尺度相关性,通过尺度传递关系来捕获轮廓以及细节信息,因此可以得到优于阈值方法的结果.充分说明了 CHMT 模型和式(11)的有效性.

SAR 图像的斑点抑制过程是一个盲的恢复过程,不能用 PSNR 来评价去噪结果,通常等效视数(ENL)用来衡量去斑效果的好坏,定义为 μ^2 / σ^2 ,其中 μ, σ^2 分别对应强度 SAR 的均值和方差,ENL 理论上等于 SAR 图像的视数,通过比较 ENL 可以近似地从客观角度衡量斑点抑制效果,理想的客观评价结果是在 ENL 控制在一定范围内时得到较好的边缘保持效果.

由图4可以看出本文方法的斑点抑制结果在获得理想 ENL 的同时得到了较理想的结果.下面给出另外一副相干斑较严重的 SAR 图像的实验结果.

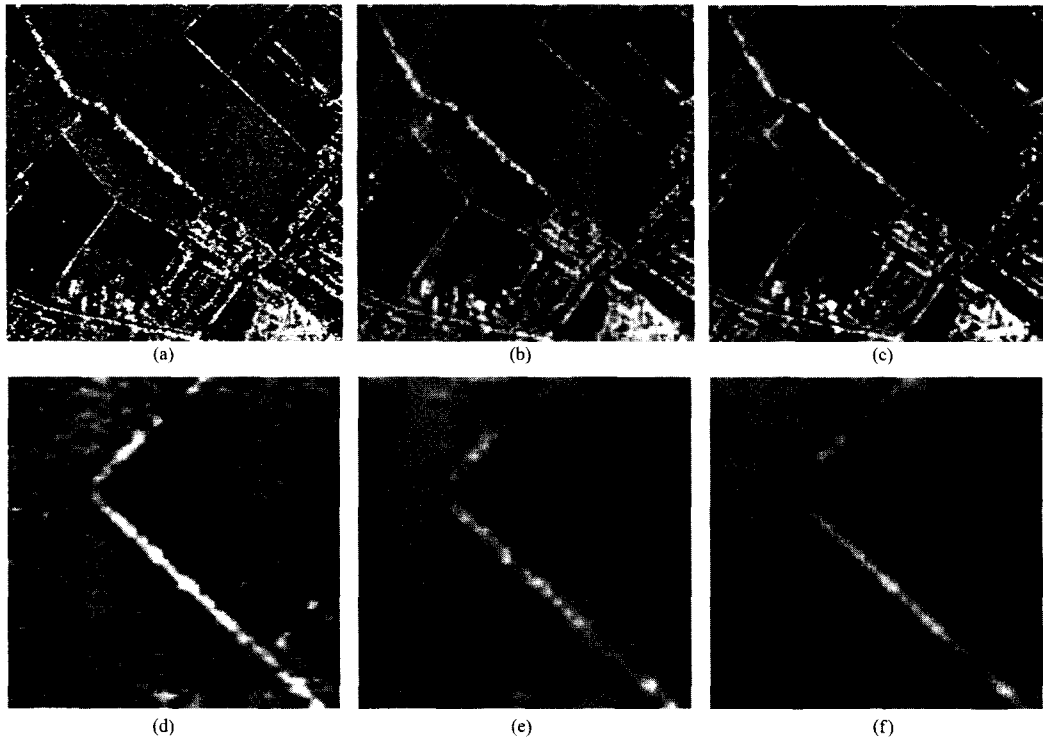


图4 SAR 图像实验结果对比,(a)(b)(c)分别为 SAR 原图、小波域 HMT 模型和 CHMT 模型的结果,(d)(e)(f)分别为局部放大和小波域 HMT 模型和 CHMT 模型的结果

Fig. 4 Comparison of results of SAR images. (a) SAR image, (b) WHMT despeckling, (c) CHMT despeckling, (d)(e)(f) local zoom in results

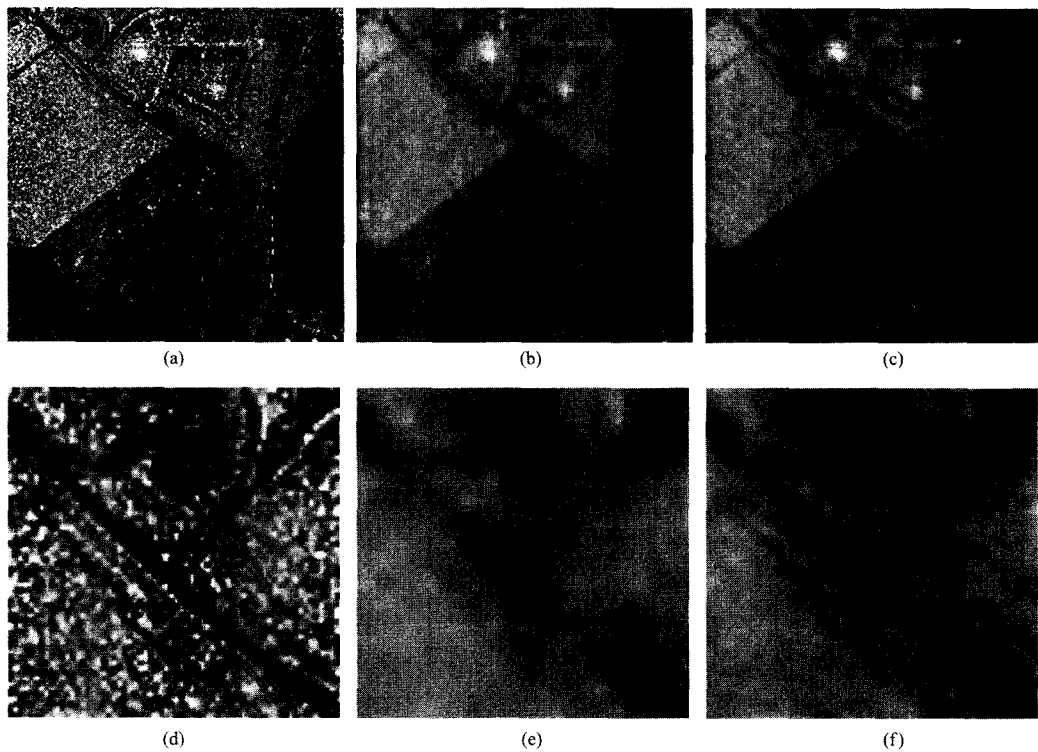


图5 SAR 图像实验结果对比,(a)(b)(c)分别为 SAR 原图、小波域 HMT 模型和 CHMT 模型的结果,(d)(e)(f)分别为局部放大和小波域 HMT 模型和 CHMT 模型的结果

Fig. 5 Comparison of results of SAR images, (a) SAR image, (b) WHMT despeckling, (c) CHMT despeckling, (d)(e)(f) local zoom in results

由图 4 图 5 可以看出本文方法不但在斑点抑制上而且在方向信息保持上明显优于小波域方法。

4 结语

基于 SAR 图像统计特性和几何多尺度统计模型给出一种相干斑抑制方法. 该方法在 Contourlet 几何多尺度变换域分析了 SAR 图像统计特性, 与隐马尔可夫树模型相结合, 利用最小均方误差估计和 Bayes 估计给出一种有效的系数收缩算子. 在自然图像去噪和 SAR 图像斑点抑制实验中与小波域 HMT 算法进行了比较, 本文方法在相干斑抑制和方向信息保持上均有明显改进.

REFERENCES

- [1] Hua X, Pierce L E, Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(3): 721—727.
- [2] Min D, Cheng P, Chan A K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(8): 1642—1648.
- [3] Foucher S, Benie G B, Boucher J M. Multiscale MAP filtering of SAR images [J]. *IEEE Transaction on Image Processing*, 2001, **10**(1): 49—60.
- [4] Argenti F, Alparone L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(11): 2363—2374.
- [5] ZHAO Xia, WANG Zheng-Ming. Adaptive regularization variation method for SAR image feature-enhancement and speckle-removal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵侠, 王正明. SAR 图像相干斑抑制和特征增强的自适应正则化变分方法. *红外毫米波学报*), 2007, **26**(2): 112—116.
- [6] Achim A, Tsakalides P, Bezerianos A. SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on heavy-tailed modeling [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(8): 1773—1784.
- [7] JIAO Li-Cheng, TAN Shan. Development and prospect of image multiscale geometric analysis [J]. *ACTA Electronica Sinica* (焦李成, 谭山. 图像多尺度几何分析: 回顾和展望. *电子学报*), 2003, **31**(12A): 43—50.
- [8] YANG Shu-Yuan, WANG Min, JIAO Li-Cheng. High-ratio compression of remote sensing image based on ridgelet and neural network [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨淑媛, 王敏, 焦李成. 基于脊波和神经网络的大压缩比遥感图像压缩. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4): 297—301.
- [9] Do M N, Vetterli M. Contourlets: a new directional multi-resolution image representation [C]. *Signals, Systems and Computers, Conference Record of the Thirty-Sixth Asilomar Conference*, 2002, **1**, 3—6.
- [10] Po D D-Y, Do M N. Directional multiscale modeling of image using the contourlet transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(6): 1610—1620.

(上接第 61 页)

因此, 对于远距离、复杂背景辐射功率探测条件下的激光高度计接收系统设计, 除采取减小接收视场、压低窄带滤光片带宽等光学系统设计措施外, 还需根据背景辐射功率的情况, 对雪崩二极管的倍增因子进行控制, 保证接收系统的最佳信噪比。

REFERENCES

- [1] CHEN Yu-Wei, ZHANG Li, HU Yi-Hua, et al. Array detection technology of echo on earth observation laser imager [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈育伟, 张立, 胡以华, 等. 对地观测激光成像的回波阵列探测技术. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(3): 169—171.
- [2] CHEN Dianren, ZOU Chao. The research of APD laser echo - wave signal detect circuit system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology* (陈殿仁, 邹超. APD 激光回波信号探测电路系统研究. *长春理工大学学报*), 1999, **25**(2): 16—17.
- [3] WU Gang, LI Chun-Lai, LIU Yin-Nian, et al. Study on high resolution time interval measurement module in pulsed laser ranging system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴刚, 李春来, 刘银年, 等. 脉冲激光测距系统中高精度时间间隔测量模块的研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 213—216.
- [4] QI Hong-Xing, SHU Rong, MA De-Min, et al. Elemental recognition method based on laser induced breakdown spectroscopy [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (齐洪兴, 舒嵘, 马德敏, 等. 基于激光诱导离解光谱技术的元素识别方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4): 52—55.
- [5] LIANG Fang, SUN Xiao-Ming, QIANG Xi-Fu. Range estimation in phase-shift laser rangefinder with non-cooperative target [J]. *Optical Technique* (梁芳, 孙晓明, 强锡富. 非合作目标相位式激光测距系统的测程估计. *光学技术*), 1999, **5**: 29—30.
- [6] Cole T D, Davidson F M. Performance evaluation of the near-earth asteroid rendezvous (NEAR) laser rangefinder [J]. *Proc. SPIE, Photonics for Space Environments IV*, 1996, **2811**: 164—165.
- [7] ZHANG Hai-Hong, WANG Jian-Yu, SHU Rong, et al. Effects of solar radiation on the receiver of near infrared laser altimeter [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张海洪, 王建宇, 舒嵘, 等. 太阳辐照对近红外激光高度计接收系统的影响. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 426—428.