

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **11**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012 年 11 月 第 17 卷 第 11 期(总第 199 期)

目 次

综述

数字图像合成技术综述 吴昊, 徐丹(1333)

图像处理和编码

基于群稀疏的结构化字典学习 郭景峰, 李贤(1347)

SSIM 度量虚拟视点绘制失真的深度图帧内编码 喻莉, 张军涛, 邓慧萍, 向森, 周鹏, 左雯, 王宁(1353)

统计量移位的鲁棒无损图像信息隐藏 李晓博, 周詮(1359)

伪造图像典型篡改操作的检测 左菊仙, 刘本永(1367)

图像分析和识别

融合灰度和 SURF 特征的红外目标跟踪 范新南, 丁朋华, 刘俊定, 张学武(1376)

海面温度栅格图的锋面提取与矢量化 崔雪森, 周为峰, 王栋, 张胜茂(1384)

交通场景中车辆的运动检测与阴影消除 王彬, 冯远静, 郭海峰, 张贵军(1391)

基于随机点积图的图像标注改善算法 孙登第, 罗斌, 郭玉堂(1400)

图像理解和计算机视觉

有监督子空间建模和稀疏表示的场景分类 段菲, 章毓晋(1409)

对立色 LBP 模型的目标跟踪 张炯, 宁纪锋, 颜永丰, 于伟(1418)

计算机图形学

联合骨架与边界特征的平面形状分解..... 蒋建国, 周丹凤, 郝世杰, 郭艳蓉, 詹曙(1425)

屏幕空间自适应的地形 Tessellation 绘制 张兵强, 张立民, 艾祖亮, 张建廷(1431)

遥感图像处理

SAR 图像稀疏优化滤波 杨萌, 张弓(1439)

分段线性动态矩匹配条带去除..... 秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 陈蕾, 陈启东(1444)

基于 Harris 角点和 SIFT 描述符的高分辨率遥感影像匹配算法 陈梦婷, 闫冬梅, 王刚(1453)

第八届图像图形技术与应用学术会议征文通知 (1460)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健 月刊(1996 年创刊) 第 17 卷 第 11 期 2012 年 11 月 16 日出版

主管单位	中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院遥感应用研究所 中国图象图形学学会 北京应用物理与计算数学研究所	Sponsored by	Institute of Remote Sensing Application, CAS China Society of Image and Graphics Institute of Applied Physics and Computational Mathematics
主 编	李小文	Chief editor	LI Xiaowen
编辑出版	《中国图象图形学报》编辑出版委员会 北京 9718 信箱 邮编 100101 电子信箱:jig@irsa.ac.cn 电话:010-64807995 010-82614429 网 址:www.cjig.cn	Editor, Publisher	Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics (P. O. Box 9718, Beijing 100101, China) E-mail:jig@irsa.ac.cn
印刷装订	北京北林印刷厂	Distributed by	Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
广告经营许可证	京朝工商广字第 0346 号	Domestic	All Local Post Offices in China
总 发 行	北京报刊发行局	Foreign	China International Book Trading Corporation (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)
订 购	全国各地邮局	Printed by	Beijing Beilin Printing House
国外发行	中国国际图书贸易总公司 (中国国际书店) (北京 399 信箱 邮编 100044)		

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)11-1439-05

论文引用格式: 杨萌, 张弓. SAR 图像稀疏优化滤波[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(11): 1439-1443.

SAR 图像稀疏优化滤波

杨萌, 张弓

南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016

摘要: 提出一种基于稀疏优化模型的 SAR 图像滤波算法。该算法建立在超完备字典稀疏表示基础上, 具有较强的数据稀疏性和稳健的建模假设。首先依据 SAR 图像的结构特征, 运用正则化方法建立多目标稀疏优化模型, 然后通过冗余字典稀疏优化变换系数, 利用冗余字典以及具有点奇异性的小波和线奇异性的剪切波构造超完备字典, 最后通过对优化问题的求解, 重建 SAR 图像场景分辨单元的平均强度, 实现了 SAR 图像的滤波。实验结果表明, 该算法对 SAR 图像相干斑噪声具有很好的抑制效果, 并且具有增强滤波图像纹理细节特征的优点。

关键词: 滤波; 合成孔径雷达图像; 稀疏优化; 小波; 剪切波

SAR images filtering via sparse optimization

Yang Meng, Zhang Gong

College of Electronics & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: In this paper, a new method for filtering SAR images using sparse optimization model is proposed. The algorithm based on sparse representation via an over-complete dictionary has a strong data sparseness and provides solid modeling assumptions for the data sets. First, a sparse optimization model based on structural properties of then SAR image is built by regulation. Second, a practical optimization strategy is used to design a redundancy dictionary. Then, an over-complete dictionary is constructed by employing a combined dictionary consisting of wavelets, shearlets, and a redundancy dictionary. Finally, the filtering process is realized through the solution of the multi-objective optimization problem in which the mean backscatter power is reconstructed. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm has good de-speckling capability and better enhances image details.

Key words: filtering; SAR image; sparse optimization; wavelets; shearlets

0 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候的探测与侦察跟踪能力, 能有效地识别伪装和穿透掩盖物。SAR 被广泛应用于航空摄影测量与遥感、卫星海洋观测、航天侦察、图像匹配制导、深空探测等。

SAR 是微波相干成像, 当相干电磁波照射实际目标时, 散射回波并非完全由地物目标散射系数决

定, 而是围绕散射系数值有较大的随机波动, 这种随机波动在 SAR 图像上就表现为相干斑噪声。斑点噪声的存在使得 SAR 图像的信噪比下降, 严重时使得图像模糊, 甚至图像特征消失。SAR 图像受其固有的相干斑的影响, 不能有效地反映地物目标的散射特性, 严重影响了图像的质量, 所以抑制相干斑和滤波细节特征, 是 SAR 图像应用性研究的一个重要的课题。

目前的 SAR 图像滤波算法主要包括多视处理

收稿日期: 2012-01-11; 修回日期: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071163); 航空基金项目(2011ZC52034); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11_0197)

第一作者简介: 杨萌(1980—), 男, 现为南京航空航天大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要从事遥感图像分析和信号稀疏性分析方面的研究工作。E-mail: yangmeng372901@163.com

方法、基于估计理论的方法、基于频率域的方法、基于偏微分方程的方法和基于超完备字典学习的方法。多视处理方法适用于雷达散射截面(RCS)比较均匀的 SAR 图像,但同时也会降低分辨率,模糊小目标。基于估计理论的方法建立在精确的场景模型分布和噪声模型分布的基础上,如 Lee 滤波^[1]、Frost 滤波、Map 滤波等,其降噪效果受限于模型分布的估计精度。基于频率域的方法比较有代表性的有小波变换域滤波^[2]、多尺度几何分析方法滤波等,该类方法主要运用收缩的处理手段,去除或削弱与噪声相关的系数,降噪效果很大程度上取决于阈值的确定方法。基于偏微分方程的滤波算法,如扩散滤波^[3-4]等,在抑制相干斑的同时,具有保持图像细节的优点,该类算法的另一个优点是数值求解理论比较成熟,但由于扩散函数是基于图像梯度计算出来的,从而对噪声敏感,随着噪声强度的提高,滤波过程对图像的视觉破坏会比较严重。总体来讲,上述 SAR 图像的降噪算法,是在去除相干斑噪声和保持纹理、边缘等细节信息之间寻求合理的折中。基于超完备字典的 SAR 图像稀疏表示具有稀疏性、特征保持性、可分性等特点,被广泛应用于图像处理领域。文献[5]所提出的 SAR 图像滤波算法是一种基于 K-SVD^[6]超完备字典学习的 SAR 图像降噪算法,该算法假设目标的雷达散射截面(RCS)和相干斑服从由乘积模型发展的统计模型,由此获得算法的相应参数估计。基于图像信息具有自相似性特点的 K-SVD 算法为图像的稀疏表示理论提供了一种有效的超完备字典学习方法,但由于 K-SVD 算法对含噪声 SAR 图像的高频点奇异和线奇异特征损失较大,K-SVD 滤波算法并不太理想。在此背景下,提出一种更有效的 SAR 图像降噪算法。

本文旨在探讨一种新的基于稀疏超完备字典的 SAR 图像滤波算法:构造稀疏优化模型,针对 SAR 图像所固有的低频和高频稀疏结构信息,将稀疏优化模型的求解过程分解为两个步骤进行处理,首先通过贪婪算法重建图像低频分量,然后利用小波和剪切波对图像高频分量的点奇异性和线奇异性进行稀疏表示,运用阈值设定和特征融合,通过迭代优化方式重建 SAR 图像的高频分量,最后融合低频分量和高频分量信息实现 SAR 图像的滤波。

1 SAR 图像滤波的稀疏优化模型

SAR 图像的强度测量值、反射系数和相干斑噪声

之间具有复杂的非线性关系,相干斑的模型可以看成是不同的后向散射波之间的一种干涉现象,这些散射单元随机地分散在分辨单元的表面。这里,考虑 SAR 图像的强度测量值、反射系数和相干斑噪声之间的关系模型,并以此为基础获得降噪算法的优化模型。

Goodman^[7]研究指出,当 SAR 图像系统的分辨单元小于目标的空间细节时,认为 SAR 图像中像素的退化是彼此独立的,斑点噪声可以被建模为乘性噪声,即

$$\tilde{I} = NI \quad (1)$$

式中, $\tilde{I}$ 是获取的 SAR 图像, I 是场景分辨单元的平均强度, N 是斑点噪声。SAR 图像中的斑点噪声不仅包含乘性噪声还包含加性噪声,故将乘性噪声模型转化为加性噪声模型,考虑模型

$$\tilde{I} = I + I(N - 1) \quad (2)$$

乘性斑点噪声的方差随着观测强度和场景的后向散射的变化而变化。采用式(2)所示的加性噪声模型。

稀疏优化(sparse optimization)是指在满足一定的约束条件下,运用最优化方法求出具有稀疏性的解^[8-12]。运用冗余离散余弦变换字典 ψ_0 ,设 ψ_1 和 ψ_2 分别是带限、非抽样、紧支撑小波和带限、紧支撑剪切波的正交变换基。稀疏超完备字典的 SAR 图像降噪问题可以描述为稀疏优化模型,即

$$(\tilde{V}, \tilde{W}_j, \tilde{S}_j) = \underset{W_j, S_j, V}{\operatorname{argmin}} \|\psi_0^T V\|_1 + \|\psi_1^T W_j\|_1 + \|\psi_2^T S_j\|_1$$

$$\text{满足 } \|\tilde{I} - V - W_j - S_j\|_2 < \varepsilon \quad (3)$$

式中, ψ_0^T 、 ψ_1^T 和 ψ_2^T 分别为 ψ_0 、 ψ_1 和 ψ_2 的逆变换; $\psi_0^T V$ 、 $\psi_1^T W_j$ 和 $\psi_2^T S_j$ 分别是 $\tilde{I}$ 所对应的低频分量 V 、高频分量 W_j 和 S_j 在 ψ_0 、 ψ_1 和 ψ_2 下的变换系数, j 为多分辨率尺度, J 为分解层数,且 $0 \leq j \leq J$ 。

求解式(3)所示稀疏优化模型得到 V 、 W_j 和 S_j , $0 \leq j \leq J$ 。则得到滤波后的 SAR 图像 $\tilde{I}$:

$$\tilde{I} = V + \sum_j W_j + \sum_j S_j \quad (4)$$

对式(3)进行优化求解是一个比较复杂的过程,这里将其分解为两个步骤进行处理。首先构造冗余离散余弦变换字典 ψ_0 ,通过求解式(5)优化问题获得反映场景分辨单元平均强度的低频分量 V 。

$$\tilde{V} = \underset{V}{\operatorname{argmin}} \|\psi_0^T V\|_1 \text{ 满足 } \|\tilde{I} - V\|_2 < \varepsilon \quad (5)$$

然后求解优化问题

$$(\tilde{W}_j, \tilde{S}_j) = \underset{\tilde{W}_j, \tilde{S}_j}{\operatorname{argmin}} \|\psi_1^T W_j\|_1 + \|\psi_2^T S_j\|_2$$

$$\text{满足 } \|\tilde{I} - W_j - S_j - \tilde{V}\|_2 < \varepsilon \quad (6)$$

可以获得高频分量 W_j 和 S_j , $0 \leq j \leq J$ 。接下来,将分别用低频分量稀疏优化算法和高频分量稀疏优化算法求解式(5)(6)。

2 稀疏优化模型求解算法

2.1 低频分量稀疏优化算法

对图像 SAR 图像 $\tilde{I}$ 的每个像素取 h_0 邻域,将 $\tilde{I}_{mn}$ ($1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$) 的 $h_0 \times h_0$ 邻域中列向量首尾相接重排为 h_0^2 维列向量,这些列向量组成信号集合 $\mathbf{X}$,即 $\mathbf{X}$ 中的元素是 SAR 图像中各像素的局部邻域像素所构成的列向量。信号集合 $\mathbf{X}$ 在冗余字典 ψ_0 下的稀疏表示系数集合 α 。

低频分量稀疏优化算法如下:

1) 选取冗余离散余弦变换矩阵作为冗余字典 ψ_0 。

2) 在 L^2 范数意义下归一化字典 ψ_0 的各原子。

3) 用正交匹配追踪(OMP)算法计算信号集合 $\mathbf{X}$ 在字典 ψ_0 下的稀疏表示系数集合 α ,即求解优化问题 $\forall X^l \in \mathbf{X}, l = 1, \dots, L$

$$\operatorname{argmin} \|\alpha^l\|_{L^0} \text{ 满足 } \|X^l - \psi_0 \alpha^l\|_2 \leq \varepsilon_X$$

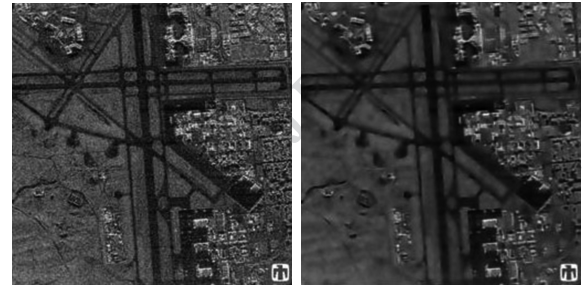
式中, X^l 表示 $\mathbf{X}$ 的第 l 元素, α^l 表示 α 的第 l 元素, L^0 表示 0 范数, $\operatorname{argmin} \|\cdot\|_{L^0}$ 表示非 0 元素的最小个数。

4) 输出结果 ψ_0 和 α 。

5) Γ_{mn} 为集合 $\psi_0 \alpha$ 中对应于 (m, n) 位置像素 I_{mn} 的向量均值,令 $\mathbf{V} = \Gamma$,得到低频分量。这里, Γ 是以 Γ_{mn} 为元素的 2 维数据。

选取一组实测 SAR 图像,如图 1(a)和图 2(a)所示。图 1(a)是在新墨西哥州阿尔伯克基地区国际机场获取的 SAR 图像(3 m 分辨率)。图 2(a)是在新墨西哥州阿尔伯克基地区马场获取的 SAR 图像(1 m 分辨率)。低频分量稀疏优化算法中的各项参数选取:字典 ψ_0 原子个数 144,滑动窗口大小 $h = 6$, $\varepsilon_X = 0.3M_I$,这里 $M_I = \max_{m,n} \{\tilde{I}_{m,n}\}$ 。实验结果如图 1、图 2 和图 3 所示。图 1(b)和图 2(b)是两幅 SAR 图像分别获得的低频分量 $\mathbf{V}$ 。图 3(a)和(b)是两幅 SAR 图像分别获得的含噪声高频分量 $\tilde{I} - \mathbf{V}$ 。

将利用低频分量稀疏优化算法得到 SAR 图像 $\tilde{I}$ 的低频分量 $\mathbf{V}$ 以及 SAR 图像 $\tilde{I}$ 的高频分量 $\tilde{I} - \mathbf{V}$ 。接

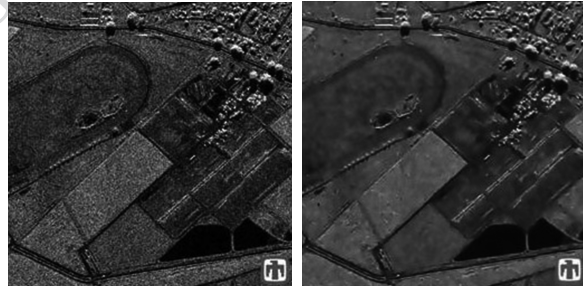


(a) SAR 图像

(b) 低频分量

图 1 SAR 图像低频分量

Fig. 1 Low-frequency component of SAR image

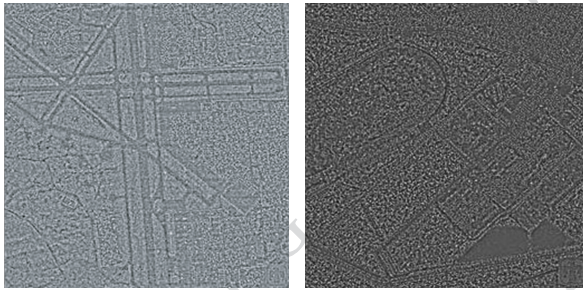


(a) SAR 图像

(b) 低频分量

图 2 SAR 图像低频分量

Fig. 2 Low-frequency component of SAR image



(a) 高频分量(图1(a))

(b) 高频分量(图2(a))

图 3 SAR 图像高频分量

Fig. 3 High-frequency component of SAR image

下来,将利用非抽取小波和剪切波获得 SAR 图像 $\tilde{I}$ 在高频分量 $\tilde{I} - \mathbf{V}$ 的点奇异特征和线奇异特征,最后利用式(4)实现在稀疏表示框架下 SAR 图像的滤波。

2.2 高频分量稀疏优化算法

通过迭代阈值收缩方法求解 SAR 图像高频分量 $\tilde{I} - \mathbf{V}$ 的稀疏优化模型式(6)。

高频分量稀疏优化算法如下:

1) 计算高频分量 $\tilde{I} - \mathbf{V}$ 的非抽取小波变换系数 β_d^j 和剪切波变换系数 γ_d^j ,这里 j 是分解层数, $0 \leq j \leq J$, d 是方向指标。

2) 利用小波系数高频分量 β_d^j ($1 \leq j \leq J$) 的高频对角线分量,利用文献[13]方法估计噪声 $\hat{\sigma}_n^2$ 。

3) 利用因子 $\lambda_j (0 \leq j \leq J)$ 调制剪切波变换系数 γ_d^j , 即 $\hat{\gamma}_d^j = \lambda_j \gamma_d^j (0 \leq j \leq J)$ 。因子 λ_j 用于控制高频信息, 即可增强图像高频信息, 也可抑制虚假边缘信息的出现。

4) 设定收缩阈值 $T_3 = \mu \hat{\sigma}_n^2$ 和迭代次数 N_3 , 初始化高频分量 W_j 和 $S_j (0 \leq j \leq J)$ 为 0。

(1) 计算残差: $\rho = \tilde{I} - V - W_j - S_j$ 。

(2) 计算残差 ρ 的非抽取小波变换系数 $\bar{\beta}_d^j$ 和剪切波变换系数 $\bar{\gamma}_d^j$, 这里 j 是分解层数, $0 \leq j \leq J$ 。

(3) 分别将 $\bar{\beta}_d^j$ 和 $\bar{\gamma}_d^j$ 归一化的系数分量小于阈值的系数值设为 0, 仍分别记作 $\bar{\beta}_d^j$ 和 $\bar{\gamma}_d^j$ 。

(4) 对 $\bar{\beta}_d^j$ 和 $\bar{\gamma}_d^j$ 作逆小波变换和逆剪切波变换, 得到高频分量 W_j 和 $S_j (0 \leq j \leq J)$ 。

5) 输出结果 W_j 和 S_j 。

利用高频分量稀疏优化算法得到 SAR 图像 $\tilde{I}$ 的高频分量 W_j 和 S_j 。于是, 利用式(4)可以得到滤波后的 SAR 图像 $\tilde{I}$ 。

3 实验结果及分析

稀疏优化模型算法中的各项参数选取: 字典原子个数 144, 滑动窗口大小 $h = 6$, $\varepsilon_x = 0.3M_{\tilde{I}}$, 这里 $M_{\tilde{I}} = \max_{m,n} \{ \tilde{I}_{m,n} \}$, $N_3 = 10$, 因子参数 $\mu = 3$, 分解层数 $J = 4$, 因子参数 $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1.5$; Lee 滤波算法^[1] 滑动窗口大小 $h = 5$; K-SVD 滤波算法^[5] 中的各项参数选取: 字典原子个数 $k = 144$, 滑动窗口大小 $h = 6$, SAR 图像估计等效视数 $L = 2$ 。SAR 图像降噪系统基于 Matlab 7.0 平台开发。选取一组实测 SAR 图像, 如图 1(a) 所示的实测 SAR 图像。Lee 滤波算法、IACDF(自适应度扩散滤波器)滤波算法^[3]、K-SVD 滤波算法(对数强度图像)、本文算法所得到的滤波后的 SAR 图像如图 4(a)~(d) 图所示。

对于 SAR 图像的滤波性能评价指标, 这里主要考虑: 边缘保持指数 (ESI)^[14] 和对比度滤波指数 (CII)。对比度滤波指数 CII 定义为

$$CII = \frac{\sigma_{\tilde{I}}^2}{\sigma_{\tilde{I}}^2} \frac{4/M_{\tilde{I}}}{\sigma_{\tilde{I}}^2} \quad (7)$$

式中, $\sigma_{\tilde{I}}^2$ 和 $\sigma_{\tilde{I}}^2$ 是原图像 $\tilde{I}$ 和滤波后图像 $\tilde{I}$ 的方差; $M_{\tilde{I}}$ 和 $M_{\tilde{I}}$ 是原图像 $\tilde{I}$ 和滤波后图像 $\tilde{I}$ 的四阶矩。边缘指数越大, 边缘保持越好。对比度滤波指数越大, 图像滤波效果越好。对图 4 中各滤波算法的性能评价指标如表 1 所示。

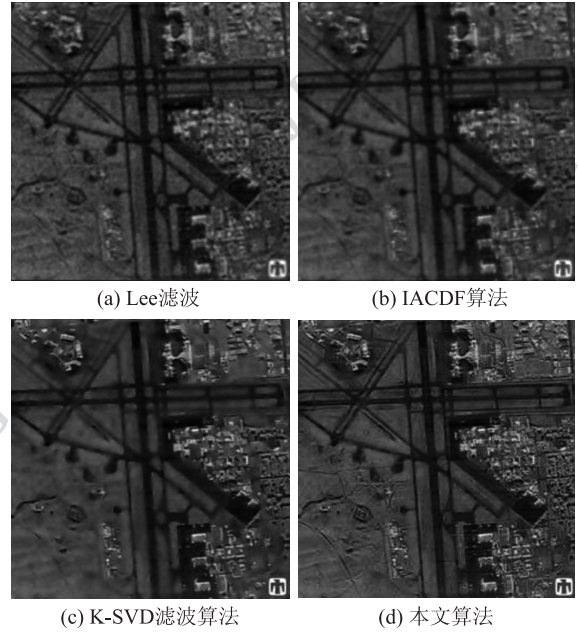


图 4 SAR 图像滤波结果

Fig. 4 SAR image filtering results

表 1 4 种算法性能评价

Table 1 Evaluation of performance for four methods

	Lee 滤波	IACDF	K-SVD	本文算法
ESI	0.415 6	0.323 6	0.341 5	0.670 8
CII	0.813 6	0.772 3	0.748 4	0.873 9

选取另一组实测 SAR 图像, 如图 2(a) 所示的实测 SAR 图像。Lee 滤波算法、IACDF 滤波算法、K-SVD 滤波算法、本文算法所得到的滤波后的 SAR 图像如图 5(a)~(d) 图所示。

运用 SAR 图像的降噪性能评价指标: 边缘保持指数 (ESI)^[14] 和对比度滤波指数 (CII)。对图 5 中各滤波算法的性能评价指标如表 2 所示。

综合上述实验结果, Lee 滤波后的图像中仍然包含较多的噪声点, 而且点目标也存在一定程度的模糊。改进的 IACDF 滤波能够自适应地选择阈值参数, 相比于传统 Lee 滤波器具有更好的边缘锐化效果。K-SVD 滤波算法对含噪声 SAR 图像的高频点奇异和线奇异特征损失较大, 且对含噪声 SAR 图像的静态假设有时会与实际的观测信号统计分布不吻合, 所以 K-SVD 滤波算法并不太理想。本文算法利用新的稀疏优化模型和贪婪算法获得 SAR 图像的低频分量, 以及包含点奇异性和线奇异性的高频分量。低频分量稀疏优化算法重构 SAR 图像场景分辨单元的平均强度, 一定程度上抑制了相干斑噪

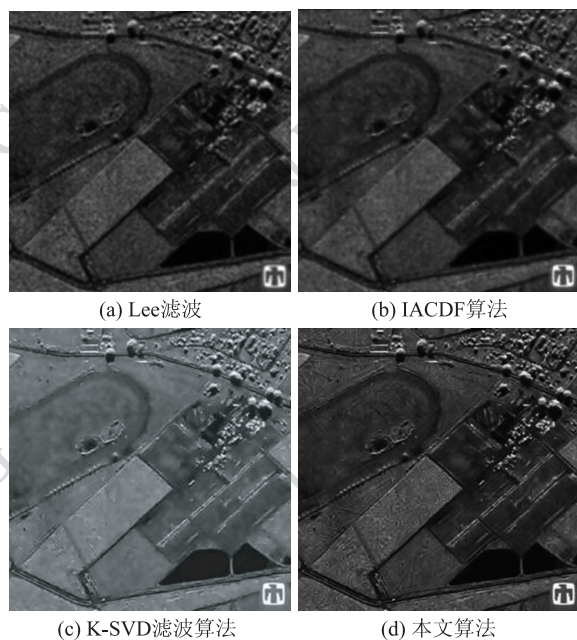


图 5 SAR 图像滤波结果

Fig. 5 SAR image filtering results

表 2 4 种算法性能评价

Table 2 Evaluation of performance for four methods

	Lee 滤波	IACDF	K-SVD	本文算法
ESI	0.356 9	0.280 3	0.450 3	0.574 8
CII	0.795 7	0.734 3	0.816 4	0.849 9

声,而后利用带限、非抽样、紧支撑小波和带限、紧支撑剪切波实现了高频分量中线特征和点特征的滤波处理,综上所述,本文算法在多个方面优于 Lee 滤波、IACDF 算法和 K-SVD 滤波算法。

4 结 论

首先简要地分析了目前的 SAR 图像滤波算法,各算法本身不能既保持图像细节特征又不降低图像的滤波效果。针对 SAR 图像内在的结构信息,通过构建稀疏优化模型提出了一种滤波 SAR 图像细节特征信息的滤波算法。运用正则化方法重建 SAR 图像的低频分量。通过小波、剪切波所具有的点奇异性、线奇异性捕捉图像的细节特征。通过融合方式获得 SAR 图像场景分辨单元,从而实现了 SAR 图像的滤波。实验结果和性能分析表明,本文算法对 SAR 图像相干斑噪声有很好的抑制效果,并且具有增强滤波图像细节信息的优点。

参考文献 (References)

- [1] Lee J. Refined filtering of image noise using local statistics [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1981, 15 (4): 380-389.
- [2] Jennifer R J, Thiruvengadam S. J. Generalized SAR despeckling based on DTCWT exploiting interscale and intrascale dependences [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 552-556.
- [3] Bernardes R, Maduro C, Serranho P, et al. Improved adaptive complex diffusion despeckling filter [J]. Optics Express, 2010, 18(23): 24048-24059.
- [4] Srivastava R, Gupta J R P, Parthasarthy H. Comparison of PDE based and other techniques for speckle reduction from digitally reconstructed holographic images [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(5): 626-635.
- [5] Foucher S. SAR image filtering via learned dictionaries and sparse representations [C]// IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium. Boston, MA: IEEE, 2008, 229-232.
- [6] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: an algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (11): 4311-4322.
- [7] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1976, 66(11): 1145-1150.
- [8] Engan K, Skretting K, Husøy J H. Family of iterative LS-based dictionary learning algorithms, ILS-DLA, for sparse signal representation [J]. Digital Signal Processing, 2007, 17 (1): 32-49.
- [9] Varshney K R, Çetin M, Fisher J W, et al. Sparse representation in structured dictionaries with application to synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56(8): 3548-3561.
- [10] Duarte-Carvajalino J M, Sapiro G. Learning to sense sparse signals: simultaneous sensing matrix and sparsifying dictionary optimization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2009, 18(7): 1395-1408.
- [11] Skretting K, Engan K. Recursive least squares dictionary learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(4): 2121-2130.
- [12] Candès E, Tao T. Near optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.
- [13] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage [J]. Biometrika, 1994, 81(3): 425-455.
- [14] Zhang W G, Zhang Q, Yang C S. Improved bilateral filtering for SAR image despeckling [J]. Electronic Letters, 2011, 47 (4): 286-288.