

Journal of Image  
and Graphics

# 中国图象图形学报



ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB

2012  
Vol.17 No.

4

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4月 第17卷 第4期(总第192期)

## 目次

### 综述

图像分割中的模糊聚类方法 ..... 李旭超, 刘海宽, 王飞, 白春艳(447)

### 图像处理和编码

GPU 辅助的希尔伯特变换轮廓术 ..... 周波, 赵小敏, 王东平(459)

引入连续性强度和置信度因子的快速图像修复 ..... 李开宇, 孙玉刚(465)

自适应的有效非局部图像滤波 ..... 许光宇, 檀结庆, 钟金琴(471)

改进的 PMD 距离图像超分辨率重建算法 ..... 张旭东, 沈玉亮, 胡良梅, 陈菁菁(480)

压缩感知在 Micro-CT 图像超分辨率重建中的应用 ..... 王丽艳, 韦志辉, 罗守华, 顾宁(487)

对偶四元数单片空间后方交会算法 ..... 姬亭, 盛庆红, 王惠南, 刘微微(494)

利用运动强度判据的高效自适应运动估计算法 ..... 郭晓珉, 姚睿, 刘智跃, 王友仁(504)

### 图像分析和识别

核空间散度阈值法 ..... 吴成茂(512)

近邻自适应局部尺度的谱聚类算法 ..... 孔万增, 孙昌思核, 张建海, 胡三清, 杨灿(523)

LUV 色彩空间中多层次化结构 Nyström 方法的自适应谱聚类算法 ..... 刘雅蓉, 汪西莉(530)

结合图像增强的心血管内超声中-外膜边缘检测 ..... 邱璇, 黄靖, 杨丰, 邢栋, 涂圣贤(537)

融合图像特征的一致点匹配方法及其应用 ..... 张久楼, 李春丽, 冯前进, 陈武凡, 阳维(546)

### 图像理解和计算机视觉

多蚁群动态协作优化的道路图像分割算法 ..... 林丽莉, 周文晖(553)

篮球比赛视频中持球队员行为预测 .....	王千,夏利民,谭论正(560)
利用 Principal Warps 评估颅面几何相似度 .....	朱新懿,耿国华,温超(568)

### 计算机图形学

图形处理器空间插值并行算法的实现 .....	赵艳伟,程振林,董慧,方金云(575)
------------------------	---------------------

### 虚拟现实与增强现实

面向 GPU 的批 LOD 地形实时绘制 .....	张兵强,张立民,张建廷(582)
----------------------------	------------------

### 遥感图像处理

光学遥感舰船目标识别方法 .....	杜春,孙即祥,李智勇,滕书华(589)
自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪 .....	杨萌,张弓(596)

---

第 18 届中国遥感大会征文通知 .....	封 2
第 33 届亚洲遥感会议征文通知 .....	封 2

## 中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 4 期

2012 年 4 月 16 日出版

**主管单位** 中国科学院  
**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  
**主 编** 李小文  
**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:010-68407995 010-82614429  
 网 址:www. cjig. cn  
**印刷装订** 北京北林印刷厂  
**广告经营许可证** 京朝工商广字第 0346 号  
**总 发 行** 北京报刊发行局  
**订 购** 全国各地邮局  
**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)

**Superintended by** Chinese Academy of Sciences  
**Sponsored by** Institute of Remote Sensing Application,  
 CAS China Society of Image and Graphics  
 Institute of Applied Physics and Computational  
 Mathematics  
**Chief editor** LI Xiaowen  
**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  
**Distributed by** Beijing Bureau for Distribution of Newspapers  
 and Journals  
**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading Corporation  
 (P. O. Box 399, Beijing 100044, China)  
**Printed by** Beijing Beilin Printing House

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

## 第 18 届中国遥感大会征文通知

“第 18 届中国遥感大会”将于 2012 年 10 月 19 日-23 日在武汉召开。本届会议由中国遥感委员会主办,中国测绘学会摄影测量与遥感专业委员会和武汉大学承办。会议将围绕“遥感—全方位的社会服务”这一宗旨,以遥感学界院士与知名专家的特邀报告,分会场专题技术交流与技术讲座,重点项目研讨汇报、技术展览,新技术与新产品发布,专业委员会理事会等多种形式开展,同时举行“第 7 届中国青年遥感辩论会”和“第 2 届全国高分辨率遥感数据处理与应用研讨会”。

会议将全方位地展示遥感(RS)、全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)等方面的最新成果,为专家、学者和政府主管部门搭建联系纽带,为研发和用户提供技术交流平台,共同促进遥感科技的发展、遥感产业化的推进和大遥感体系的建立。

本届会议围绕大会主题将就遥感新理论、技术、方法和应用进行征文,范围包含但不限于以下方面:

- 1) 国家遥感中长期发展战略、国际遥感前沿与进展;
- 2) 航天、航空、低空、地面遥感技术及系统;
- 3) 光学、红外、高光谱及激光遥感技术;
- 4) 主、被动微波及雷达遥感技术;

- 5) 数字摄影测量与制图;
- 6) 高分辨率遥感数据处理与应用;
- 7) 地理空间数据处理技术与方法;
- 8) 地理国情监测(土地、农业、林业、矿产、环境、地质及水资源等);
- 9) 海洋、气象与全球变化;
- 10) 遥感、地理信息系统与导航定位系统(3S)集成与应用;
- 11) 智慧城市与数字地球;
- 12) 深空探测与行星测绘;
- 13) 教育、培训与社会公益事业。

征文采用在线方式投稿;

投稿要求:论文内容不涉密,且未在国内外学术刊物或正式学术会议上发表过;被录用的全文将收入大会论文集(送 ISTP 检索),并精选 70~90 篇口头报告论文编辑出版英文 SPIE 会议文集;大会将评选青年优秀论文(参加口头报告),论文将直接进入英文 SPIE 会议文集。

论文摘要截止日期为 2012 年 5 月 15 日,全文截稿日期为 2012 年 6 月 15 日。

会议相关信息,请查阅会议网址:<http://rsgis.whu.edu.cn/18ccrs/index.html>

“第 18 届中国遥感大会”组委会

## 第 33 届亚洲遥感会议征文通知

“第 33 届亚洲遥感会议”将由泰国地理信息和空间技术发展局(GISTDA)、科技部(MOST)和亚洲遥感协会(AARS)联合主办,于 2012 年 11 月 26-30 日,在泰国芭堤雅市宗滴恩酒店举行。这是亚洲遥感协会每年一届的系列学术会议。本届大会征文包括传感器与平台、算法和图像处理、GIS 与 Web GIS、全球导航卫星系统、灾害、自然资源、环境科学、教育和宣传、健康科学、制图、其他等方面。

会议重要日期:

论文摘要提交截止:2012 年 5 月 15 日;  
论文接收通知:2012 年 7 月 1 日;  
论文全文提交截止:2012 年 9 月 30 日;  
网上注册截止:2012 年 10 月 26 日;  
会议召开日期:2012 年 11 月 26-30 日。  
会议还将组织学生专场和技术展览,其他信息请访问会议网站:<http://acrs2012.gistda.or.th>

与往年一样,中国遥感委员会仍将鼓励中国遥感科研人员和企事业单位参加会议,并组团参加学术交流和会议展览。

中国遥感委员会

# Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 4 April 2012

## Contents

### Review

The survey of fuzzy clustering method for image segmentation ..... Li Xuchao, Liu Haikuan, Wang Fei, Bai Chunyan (447)

### Image Processing and Coding

GPU assisted Hilbert transform profilometry ..... Zhou Bo, Zhao Xiaomin, Wang Dongping (459)

Fast image inpainting algorithm introducing continuous strength and confidence factor ..... Li Kaiyu, Sun Yugang (465)

Adaptive efficient non-local image filtering ..... Xu Guangyu, Tan Jieqing, Zhong Jinqin (471)

Improved super-resolution reconstruction algorithm for PMD range image  
..... Zhang Xudong, Shen Yuliang, Hu Liangmei, Chen Jingjing (480)

Image superreconstruction for Micro-CT based on compressed sensing ..... Wang Liyan, Wei Zhihui, Luo Shouhua, Gu Ning (487)

Dual quaternion of space resection with single-image ..... Ji Ting, Sheng Qinghong, Wang Huinan, Liu Weiwei (494)

Efficient adaptive motion estimation algorithm based on motion intensity ..... Guo Xiaomin, Yao Rui, Liu Zhiyue, Wang Youren (504)

### Image Analysis and Recognition

Divergence thresholding method in kernel space ..... Wu Chengmao (512)

Spectral clustering based on neighboring adaptive local scale  
..... Kong Wanzeng, Sun Changsihe, Zhang Jianhai, Hu Sanqing, Yang Can (523)

Adaptive spectral clustering algorithm based on Nyström method with multi-level structure in LUV color space  
..... Liu Yarong, Wang Xili (530)

Image enhancement based media-adventitia border detection in intravascular ultrasound images  
..... Qiu Xuan, Huang Jing, Yang Feng, Xing Dong, Tu Shengxian (537)

Coherent point drift registration combined with image feature and its application  
..... Zhang Jiulou, Li Chunli, Feng Qianjin, Chen Wufan, Yang Wei (546)

### Image Understanding and Computer Vision

Dynamic multi-colony ant cooperative optimization schemes for road image segmentation  
..... Lin Lili, Zhou Wenhui (553)

Behavior prediction of ball carriers in basketball match videos ..... Wang Qian, Xia Limin, Tan Lunzheng (560)

Estimate of craniofacial geometry shape similarity based on principal warps  
..... Zhu Xinyi, Geng Guohua, Wen Chao (568)

### Computer Graphics

Realization of GPU parallel spatial interpolation method  
..... Zhao Yanwei, Cheng Zhenlin, Dong Hui, Fang Jinyun (575)

### Virtual Reality and Augmented Reality

GPU-based real-time terrain rendering algorithm using batched LOD  
..... Zhang Bingqiang, Zhang Limin, Zhang Jianting (582)

### Remote Sensing Image Processing

Method for ship recognition using optical remote sensing data  
..... Du Chun, Sun Jixiang, Li Zhiyong, Teng Shuhua (589)

SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary  
..... Yang Meng, Zhang Gong (596)

中图分类号: TP751.1 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2012)04-0596-07

论文引用格式: 杨萌, 张弓. 自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(4): 596-602

## 自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪

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:** 提出一种基于自适应超完备字典学习的 SAR 图像降噪。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。算法依据相干斑噪声统计特性, 通过分步优化字典原子和变换系数自适应构造超完备字典, 利用获得的超完备字典将图像局部信息投影到高维空间中, 实现图像的稀疏表示, 运用正则化方法建立多目标优化模型。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 SAR 图像的降噪。实验结果表明, 该算法对相干斑噪声有很好的抑制效果, 并且具有保持图像细节信息的优点。

**关键词:** 相干斑噪声; 合成孔径雷达图像; 字典学习; 稀疏表示; 正交匹配追踪法

### SAR images de-speckling algorithm via an adaptive over-complete learning dictionary

Yang Meng, Zhang Gong

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

**Abstract:** In this paper, a de-speckling algorithm for SAR images using an adaptive over-complete learning dictionary is proposed. The algorithm is based on sparse representation of SAR images via an over-complete dictionary. It has strong data sparseness and provides solid modeling assumptions for data sets. First, a practical optimization strategy based on statistical properties of the speckle noise is used to design a redundant dictionary via an iterative loop. Second, the SAR image is projected into a high dimensional space using the learning dictionary and a sparse representation of the SAR image is obtained. Third, a model for multi-objective optimization problem is built by a regulation method. Finally, the denoising process is realized through a 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 while preserving image details.

**Key words:** speckle noise; SAR image; dictionary learning; sparse representation; orthogonal matching pursuit algorithm

## 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

收稿日期: 2011-06-16; 修回日期: 2011-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071163)

第一作者简介: 杨萌(1980—), 男, 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

图像模糊,甚至图像特征消失。SAR 图像受其固有的相干斑噪声的影响,不能有效的反映地物目标的散射特性,严重影响了图像的质量,所以抑制相干斑噪声是 SAR 图像应用性研究的一个重要课题。

目前的 SAR 图像相干斑抑制算法主要包括多视处理方法、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<sup>[1]</sup>、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<sup>[2]</sup>、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方法,如扩散滤波<sup>[3-4]</sup>等,在抑制相干斑的同时,具有保持图像细节的优点,该类方法的另一个优点是数值求解理论比较成熟。总体来讲,上述 SAR 图像的降噪方法,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 图像滤波方法是一种基于 K-SVD<sup>[6]</sup>超完备字典学习的 SAR 图像降噪方法,该方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一种有效的超完备字典学习方法,但由于 K-SVD 算法需要对图像数据进行大量的奇异值分解运算,所以算法的时间复杂度较高。另外,由于对含噪声 SAR 图像的静态假设有时与实际的观测信号统计分布不吻合,所以文献[5]所提出的 K-SVD 滤波算法并不太理想。因此,提出一种新的自适应超完备字典学习算法对 SAR 图像进行降噪处理。

本文旨在探讨一种新的基于自适应超完备字典学习的 SAR 图像滤波方法。针对 SAR 图像所固有的稀疏结构信息,通过迭代优化的方式得到超完备字典,利用超完备字典对图像数据进行稀疏表示,运用乘性噪声模型进行参数估计和阈值设定,通过正则化方法实现 SAR 图像的降噪。

## 1 基于字典学习的 SAR 图像稀疏表示

稀疏信号表示、分析和感知是信号处理、优化方法、机器学习诸领域的研究热点之一<sup>[7-11]</sup>。尤其是最近几年,以信号稀疏性为前提的压缩感知理论受到了广泛关注<sup>[12]</sup>。传统意义上的测量算子并非总是可以或者稳定地实现信号的超分辨率稀疏表示。Candès<sup>[13-14]</sup>和 Donoho<sup>[15]</sup>等人研究表明,随机测量算子可以稳定地实现信号的超分辨率稀疏表示,由此开启了研究压缩感知(CS)这一新理论的大门。压缩感知理论主要研究信号的稀疏表示、压缩测量和重构,属于信号稀疏性分析的范畴。信号的稀疏表示,即寻求变换字典,在变换域里用少量的基元表示原信号。本文内容是在稀疏表示理论框架下,自适应地构造超完备字典实现图像数据的稀疏表示,利用正则化方法实现 SAR 图像的相干斑抑制过程。

SAR 图像数据的稀疏表示是正则化方法提高 SAR 图像分辨率所利用的重要先验知识,只有选择合适的变换基和优化算法才能实现信号数据的稀疏表示,从而得到以高概率重建场景信息。在信号处理的研究过程中发现,光滑信号的 Fourier 系数、小波系数、有界变差函数的全变差范数、振荡信号的 Gabor 系数及具有不连续边缘的图像信号的超小波系数等都具有足够的稀疏性,可以实现 SAR 图像信号的稀疏表示。最近几年,对稀疏表示研究的另一个热点是信号在冗余字典下的稀疏分解。这是一种全新的信号表示理论:用超完备的冗余函数库取代基函数,称为冗余字典,字典中的元素被称为原子。字典的选择应尽可能好地符合被逼近信号的结构,其构成可以没有任何限制,具有对数据的自适应性。从冗余字典中找到具有最佳线性组合的  $S$  项原子来表示一个信号是稀疏优化方法所研究的核心问题之一。

建立在过完备基础上的稀疏表示具有较强的数据压缩能力,并且稀疏性可以提供稳健的建模假设。本文所提出的自适应稀疏表示方法是指在图像数据处理过程中,根据处理数据的统计特征,通过学习的方式构造超完备字典的处理方法,其与所处理数据的统计分布特征、结构特征相适应,以取得最佳的处理效果。相对于非自适应构造字典方法,自适应方

法具有更好的逼近性能。下面将讨论通过自适应构造超完备变换字典将数据投影到高维空间中,实现数据信息的稀疏性表示。

设字典  $\Psi$ , 稀疏表示中由 SAR 图像  $\tilde{I}$  通过 Mean-shift 聚类算法<sup>[16]</sup> 和近邻规则得到信号集合  $X$ , 即  $X$  中的元素是 SAR 图像像素的局部邻域像素所构成的列向量, 这些列向量的获取方式是: 首先运用 Mean-shift 聚类算法对 SAR 图像  $\tilde{I}$  中像素进行分类; 其次通过近邻规则获得同质区域内最能刻画其特征的各像素的局部邻域像素, 并转化成列向量; 最后组合这些列向量得到信号集合  $X$ 。信号集合  $X$  在字典  $\Psi$  下的稀疏表示系数集合  $\alpha$ 。字典学习和稀疏表示问题可以描述为如下回归模型:

$$\min_{\Psi, \alpha} \left\{ \sum_{l=1}^L \|X^l - \Psi \alpha^l\|^2 \right\} \text{ 满足 } \forall l \|\alpha^l\|_{L_0} \leq S \quad (1)$$

式中,  $L^0$  表示 0 范数;  $X^l$  表示  $X$  的第  $l$  列向量;  $\alpha^l$  表示  $\alpha$  的第  $l$  列向量,  $S$  是自然数, 表示信号的稀疏度。

由文献[6,17]可知, 式(1)中数据拟合项可以表示为

$$\begin{aligned} \min_{\Psi, \alpha} \left\{ \|X_{\text{row}} - (\alpha \boxtimes \Psi) E_1\|^2 \right\} &= \\ \min_{\Psi, \alpha} \left\{ \left\| X - \sum_{j=1}^K \Psi^j \alpha_j \right\|_F^2 \right\} &= \\ \min_{\Psi, \alpha} \left\{ \left\| (X - \sum_{j \neq k}^K \Psi^j \alpha_j) - \Psi^k \alpha_k \right\|_F^2 \right\} &= \\ \min_{\Psi, \alpha} \left\{ \|E^{(k)} - \Psi^k \alpha_k\|_F^2 \right\} & \quad (2) \end{aligned}$$

式中,  $E^{(k)} \triangleq X - \sum_{j \neq k}^K \Psi^j \alpha_j$ ,  $\boxtimes$  表示 Khatri-Rao 矩阵积<sup>[17]</sup>;  $X_{\text{row}}$  表示将矩阵  $X$  各列向量首尾相接排成的列向量;  $E_1$  表示元素全为 1 的列向量,  $\alpha_j$  表示  $\alpha$  的第  $j$  行向量,  $\Psi^j$  表示  $\Psi$  的第  $j$  列向量。自适应超完备字典学习算法即是依据式(2), 迭代更新误差项  $E^{(k)}$  获得数据集  $X$  在优化意义下的超完备变换字典  $\Psi$  和相应变换系数  $\alpha$ , 从而实现  $X$  的稀疏表示。

自适应超完备字典学习算法:

1) 选取冗余离散余弦变换矩阵作为初始字典  $\Psi^{(0)}$ 。

2) 运用 Mean-shift 聚类算法获得 SAR 图像  $\tilde{I}$  同质区域的均值  $m_X$  和标准方差  $\sigma_X$ 。

3) 重复步骤 4) — 7), 设定停止迭代阈值  $T_1 =$

$\kappa_1 \frac{m_X}{\sigma_X}$  和迭代次数  $T_1 = \left\lfloor \kappa_1 \frac{m_X}{\sigma_X} \right\rfloor$ , 这里  $\left\lfloor \kappa_1 \frac{m_X}{\sigma_X} \right\rfloor$  表示  $\kappa_1 \frac{m_X}{\sigma_X}$  的整数部分, 转到步骤 8)。

4) 在  $L^2$  范数意义下归一化字典  $\Psi$  的各原子。

5) 用正交匹配追踪 (OMP) 算法计算信号矩阵  $X$  在字典  $\Psi$  下的稀疏表示系数矩阵  $\alpha$ , 即求解如下优化问题

$$\forall X^l \in X, l=1, \dots, L \\ \operatorname{argmin} \|\alpha^l\|_{L_0}$$

$$\text{满足 } \|X^l - \Psi \alpha^l\|^2 \leq \varepsilon \frac{m_X}{\sigma_X}。$$

6) 对  $X$  的行向量运用离散小波变换得到尺度为 1 时的低频信号矩阵  $\hat{X}$ 。

7) 此步骤是在由 OMP 算法获得系数矩阵  $\alpha$  的前提下更新字典  $\Psi$ 。对每一个  $k: 1 \leq k \leq K$ , 作循环迭代, 这里  $K$  是  $\hat{X}$  行向量的维数, 设定停止迭代阈

值  $T_2 = \kappa_2 \frac{m_X}{\sigma_X}$  和迭代次数  $T_2 = \left\lfloor \kappa_2 \frac{m_X}{\sigma_X} \right\rfloor$ , 这里

$\left\lfloor \kappa_2 \frac{m_X}{\sigma_X} \right\rfloor$  表示  $\kappa_2 \frac{m_X}{\sigma_X}$  的整数部分。

(1) 定义指标集合

$$\Omega^{(k)} = \left\{ l \mid 1 \leq l \leq L, \alpha_k^l \neq 0 \right\}$$

式中,  $\alpha_k^l$  表示  $\alpha$  的第  $l$  列向量  $\alpha^l$  的第  $k$  元素。

(2) 计算

$$E^{(k)} = \hat{X} - (\Psi \alpha - \Psi^k \alpha_k)$$

(3) 选取指标集  $\Omega^{(k)}$  在  $E^{(k)}$  中所对应的列, 记为  $E_{\Omega^{(k)}}^{(k)}$ 。

(4) 计算  $\Psi^k = \frac{E_{\Omega^{(k)}}^{(k)} \alpha_k^t}{\|\alpha_k\|^2}$ ,  $\alpha_k^t$  表示  $\alpha_k$  的转置向量。

8) 输出结果  $\Psi$  和  $\alpha$ 。

本文将利用基于字典学习的稀疏表示算法得到信号集合  $\Xi$  的变换字典  $\Psi$  以及信号的稀疏表示集合  $\Gamma$ , 实现在稀疏表示框架下 SAR 图像的相干斑噪声抑制。

## 2 SAR 图像降噪算法

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。

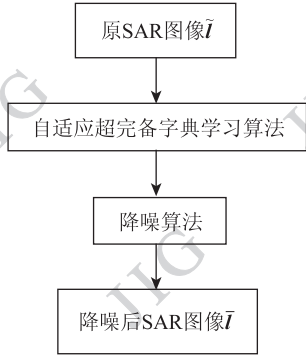


图1 本文方法用于 SAR 图像降噪的流程图

Fig.1 Flowchart of the proposed approach

Goodman<sup>[18]</sup> 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

$$\tilde{I}(i,j) = N(i,j)I(i,j) \quad (3)$$

式中,  $\tilde{I} = \{\tilde{I}(i,j)\}_{i,j}$  是获取的 SAR 图像,  $I = \{I(i,j)\}_{i,j}$  是场景分辨单元的平均强度,  $N = \{N(i,j)\}_{i,j}$  是斑点噪声。所以,如若记  $\tilde{I}$  同质区域的均值为  $m_{\tilde{I}}$  和标准方差为  $\sigma_{\tilde{I}}$ ,则有  $N$  的标准方差

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{\tilde{I}}}{m_{\tilde{I}}} \quad (4)$$

结合式(1),  $\mathbf{X}_{\tilde{I}}$  中的元素是 SAR 图像  $\tilde{I}$  各像素的局部邻域像素所构成的列向量,基于稀疏表示的 SAR 图像降噪模型可以表述为如下优化问题

$$\min_{\Psi, \alpha, l} \left\{ \sum_l \|\mathbf{X}_{\tilde{I}}^l - \Psi \alpha^l\|^2 \right\} + \sum_{i,j} \lambda \|\ln \tilde{I}_{ij} - \ln I_{ij}\|^2$$

满足  $\forall j \|\alpha^j\|_{\ell_0} \leq S \quad (5)$

或

$$\min_{\Psi, \alpha, l} \left\{ \sum_l \|\mathbf{X}_{\tilde{I}}^l - \Psi \alpha^l\|^2 \right\} + \sum_{i,j} \lambda \|\ln \tilde{I}_{ij} - \ln I_{ij}\|^2 + \sum_l \mu \|\alpha^l\|_{\ell_1} \quad (6)$$

式中,  $\lambda$  和  $\mu$  是正则化参数。

对式(6)进行优化求解是一个比较复杂的过程,这里我们将其分解为两个步骤进行处理,首先利用自适应超完备字典学习算法获得字典  $\Psi$ ,通过求解如下优化问题获得反映场景分辨单元平均强度的图像  $\hat{I}$ :

$$\min_l \left\{ \sum_l \|\mathbf{X}_{\tilde{I}}^l - \Psi \alpha^l\|^2 \right\} + \sum_l \mu \|\alpha^l\|_{\ell_1} \quad (7)$$

然后,求解如下优化问题

$$\min_l \sum_{i,j} \|M_{ij} - I_{ij}\|^2 + \sum_{i,j} \lambda \|\tilde{I}_{ij} - I_{ij}\|^2 \quad (8)$$

式中,  $M_{ij}$  为集合  $\{\Psi \alpha^l\}_l$  中对应于  $(i,j)$  位置像素  $\hat{I}_{ij}$  的向量均值。易知,式(8)存在闭形式解

$$\tilde{I}_{ij} = \frac{\tilde{I}_{ij} + \lambda M_{ij}}{2} \quad (9)$$

SAR 图像降噪算法:

- 1) 选取冗余离散余弦变换矩阵作为初始字典  $\Psi^{(0)}$ 。
- 2) 由 SAR 图像  $\tilde{I}$  各像素的局部邻域像素构成的列向量集合  $\mathbf{X}_{\tilde{I}}$ 。
- 3) 运用自适应超完备字典学习算法获得字典  $\Psi$  和稀疏表示系数集合  $\alpha$ 。
- 4) 运用式(9)计算降噪后的 SAR 图像  $\hat{I}$ 。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验结果

基于超完备字典学习的 SAR 图像降噪算法中的各项参数选取:字典原子个数  $k = 144$ , 滑动窗口大小  $h = 6$ , 因子参数  $\kappa_1 = 0.392 2M_{\tilde{I}}$ ,  $\kappa_2 = 0.392 2M_{\tilde{I}}$  和  $\varepsilon = 0.392 2M_{\tilde{I}}$ , 这里  $M_{\tilde{I}} = \max_{i,j} \{\tilde{I}_{i,j}\}$ ; Lee 滤波方法滑动窗口大小  $h = 5$ 。SAR 图像降噪系统基于 MATLAB7.0 平台开发。选取一组实测 SAR 图像,如图 2(a)所示。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。Lee 滤波方法<sup>[1]</sup>、IACDF 滤波方法<sup>[3]</sup>、本文方法得到的降噪后 SAR 图像如图 2(b)–(d)所示。

对于 SAR 图像的降噪性能评价指标,这里主要考虑均方差(MSE)、等效视数(ENL)和边缘保持指数。均方差的大小表示图像信息量的多少,标准差越大,说明其反映的信息越多。等效视数<sup>[19]</sup>是衡量一幅图像相干斑点噪声相对强度的指标,反映滤波器的斑点抑制能力。等效视数越大,表示图像上的相干斑噪声越弱。边缘保持指数  $\alpha$  定义为

$$\alpha = \frac{\sum_{i < j} |m_i^i - m_j^j|}{\sum_{i < j} |m_i^i - m_j^j|} \quad (10)$$

式中,  $m_i^i$  是滤波后图像  $\hat{I}$  的第  $i$  个同质区域的均值;  $m_j^j$  是原图像  $\tilde{I}$  的第  $j$  个同质区域的均值。边缘指数越大,边缘保持越好。对图 2 中各滤波方法的性能评价指标如表 1 所示。

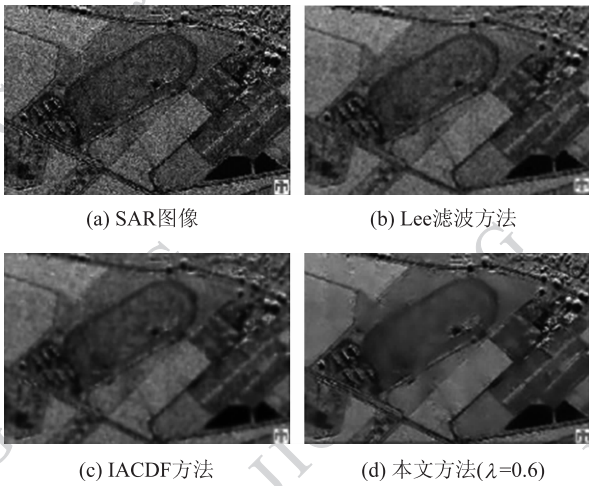


图 2 SAR 图像降噪结果

Fig. 2 SAR image de-speckling results

表 1 3 种方法性能评价

Table 1 Objective measurements with three methods

	图 2(a)	Lee 滤波	IACDF	本文方法
MSE	0.175 5	0.154 1	0.121 3	0.121 1
ENL	4.403 6	8.131 7	8.887 1	9.714 1
$\alpha$	1.000 0	0.374 0	0.400 1	0.401 1

自适应超完备字典学习算法中的各项参数选取:字典原子个数  $k = 144$ , 滑动窗口大小  $h = 6$ 。以图 2(a) 作为输入数据, 运用自适应超完备字典学习算法, 得到相应的超完备字典如图 3 所示。

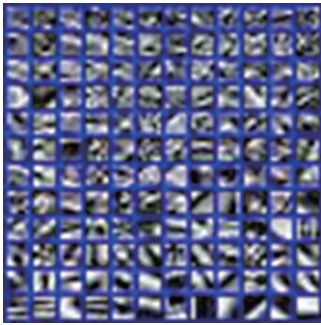
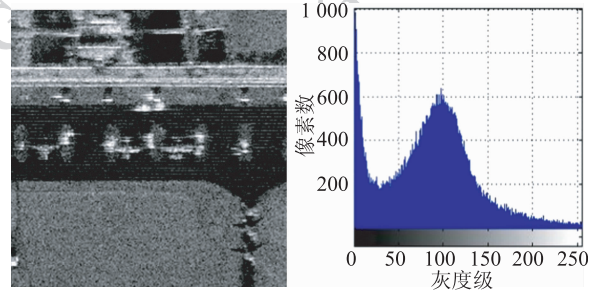


图 3 超完备字典

Fig. 3 Over-complete dictionary

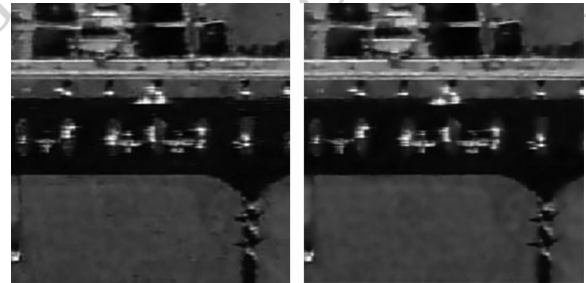
选取另一组实测 SAR 图像, 如图 4(a) 所示, 图 4(b) 给出粗略的数据密度估计。K-SVD 滤波算法中的各项参数选取:字典原子个数  $k = 144$ , 滑动窗口大小  $h = 6$ , SAR 图像估计视数  $L = 2$ ; 自适应超完备字典学习算法中的各项参数选取:字典原子个数  $k = 144$ , 滑动窗口大小  $h = 6$ 。K-SVD 滤波方法(对数强度图像)<sup>[5]</sup>、本文方法所得到的降噪后 SAR

图像如图 4(c)(d) 所示。



(a) SAR 图像

(b) 图(a)的灰度直方图



(c) K-SVD 滤波方法

(d) 本文方法( $\lambda=0.6$ )

图 4 SAR 图像降噪结果

Fig. 4 SAR image de-speckling results

运用 SAR 图像的降噪性能评价指标 MSE、ENL、 $\alpha$  和算法执行时间, 对图 4 中各滤波方法的性能评价指标如表 2 所示。

表 2 两种方法性能评价

Table 2 Objective measurements with two methods

	MSE	ENL	$\alpha$	执行时间/s
图 4(a)	0.143 3	2.125 3	1.000 0	0.0
文献[5]方法	0.107 1	5.100 2	0.442 1	137.1
本文方法	0.102 9	5.394 3	0.421 9	39.8

以图 4(a) 作为输入数据, 应用 K-SVD 算法和自适应超完备字典学习算法, 得到相应的超完备字典如图 5 所示。这里, K-SVD 算法与自适应超完备字典学习算法中的各项参数选取:字典原子个数  $k = 144$ , 滑动窗口大小  $h = 6$ 。

### 3.2 降噪性能分析

在空域滤波算法中, 滑动滤波是一个重要方法, 即在图像上取一个滑动窗口, 对窗口内的像素进行滤波处理得到窗口中心像素的滤波值, 这种方法对处理像素的窗口区域是自适应的。这种局域自适应空域滤波算法大致可分为两类, 一类是使用斑点噪声统计模型的滤波方法, 如 Lee 滤波<sup>[1]</sup>、K-SVD 滤波方法<sup>[5]</sup>等; 另一类是不使用斑点噪声统计模型的

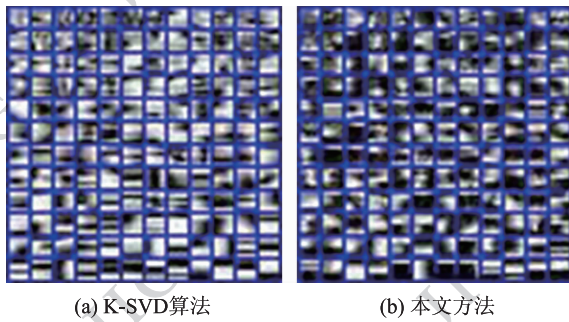


图5 超完备字典

Fig.5 Over-complete dictionaries

方法,如非线性复扩散滤波器(NCDF)<sup>[3,4]</sup>、本文方法滤波等。

基于局部统计特性的滑动窗口相干斑抑制是最早采用也是使用最为广泛的相干抑制技术方法。Lee滤波器基于完全发展的乘性斑点噪声设计,具有理论分析完善、计算简单的特点,但对场景反射系数的平稳性和各态遍历性的要求较高,这就限制了Lee滤波的降噪性能。综合3.1节实验结果, 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。

偏微分方程在图像降噪处理方面有着广泛的应用<sup>[4]</sup>,其发展过程包括由线性均匀扩散到线性非均匀扩散,再到非线性扩散以及各向异性扩散。其中非线性复扩散滤波器可以同时用于图像噪声抑制和边缘锐化,改进的自适应复扩散滤波器(IACDF)<sup>[3]</sup>能够自适应地选择阈值参数,相比于传统的非线性复扩散滤波器具有更好的滤波效果。综合3.1节实验结果, IACDF方法的边缘锐化效果好于Lee滤波。文献[5]所提出的SAR图像滤波方法是一种基于K-SVD<sup>[6]</sup>超完备字典学习的SAR图像降噪方法,该方法假设目标的雷达散射截面(RCS)和相干斑服从一定的统计模型,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算法需要对图像数据进行大量的奇异值分解运算,所以算法的时间复杂度较高。另外,由乘积模型发展的统计模型都是在相干斑噪声分量满足中心极限定理的假设前提下推导出来的,对于高分辨SAR,分辨单元非常小,以至于中心定理不再适用,因此,文献[5]中对含噪声SAR图像的静态假设有时会与实际观测信号统计分布不吻合,所以文献[5]所提出的K-SVD滤波算法并不

太理想。本文方法利用新的超完备字典学习算法对SAR图像各滑动窗口数据进行分解,获得各窗口数据的稀疏表示,一定程度上抑制了相干斑噪声,而后利用正则化方法构造优化模型,通过对优化问题的求解重构SAR图像场景分辨单元的平均强度,实现滤波处理,综合3.1节实验结果,本文方法在多个方面优于Lee滤波、IACDF方法和文献[5]中的K-SVD滤波方法。

### 3.3 降噪性能定量实验

为了凸显本文算法的降噪性能优势,讨论在不同噪声水平下,各降噪算法对噪声的抑制性能的定量比较。一般来讲,信噪比越大,图像的实际分辨能力必然越好。图像的信噪比是难于计算的,这里用信号与噪声的方差之比来近似图像的信噪比,首先计算滤波后图像 $\bar{I}$ 所有列向量的方差,将图像列向量方差的平均值认为是信号方差,求出信号方差和噪声方差的比值,再转化成dB数。信噪比定义为

$$\text{SNR} = 10 \lg \left( \frac{v}{v_n} \right) \quad (11)$$

式中, $v$ 为图像 $\bar{I}$ 的列向量的样本方差所构成的行向量的平均值; $v_n$ 为所添加噪声的方差。式(11)反映了降噪算法对噪声的抑制性能。算法对噪声的抑制性能越好,SNR的值越大。

图6(a)是实验SAR图像 $I$ ,用 $v$ 表示对图像 $I$ 所添加噪声的方差,分别以 $v$ 为自变量,以SNR为因变量,得到本文方法、Lee滤波方法、IACDF方法和K-SVD滤波方法对乘性噪声的抑制性能比较曲线(如图6(b)所示)。

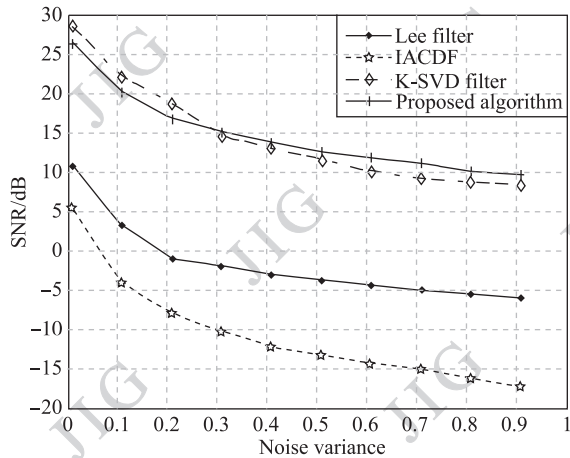
## 4 结 论

自适应变换字典具有良好的去相关性和能量压缩特性,变换后的系数实现了图像的稀疏表示。正则化方法是SAR图像提高分辨率的重要方法。本文以自适应稀疏表示算法实现自适应基变换,以正则化方法重建SAR图像场景分辨单元的平均强度,提出一种基于超完备字典学习方法的SAR图像降噪算法。该算法首先运用字典学习算法得到SAR图像中各滑动窗口数据的稀疏表示;其次采用正则化方法构造多目标优化模型;最后,通过求解相应的优化问题重建SAR图像场景分辨单元的平均强度,从而实现了SAR图像降噪过程。实验结果和性能

分析表明,本文算法具有很好的降噪性能。利用定义的图像信噪比 SNR 得到  $\nu$ -SNR 曲线,分析表明,本文方法对于乘性噪声具有很好的抑制效果。



(a) SAR图像



(b) 3种方法的 $\nu$ -SNR曲线

图 6 SAR 图像和  $\nu$ -SNR 曲线

Fig. 6 SAR image and  $\nu$ -SNR graphics of three methods

## 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 ] Gleich D, Datcu M. Wavelet-based despeckling of SAR images using Gauss-Markov random fields [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(12): 4127-4143.
- [ 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]. Proceedings of IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium. Boston, MA, 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 ] Egan 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.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] Wright J, Yang A Y, Ganesh A, et al. Robust face recognition via sparse representation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2): 210-227.
- [ 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, Egan K. Recursive least squares dictionary learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(4): 2121-2130.
- [ 12 ] Baraniuk R G, Sabharwal A. Compressive Sensing Resources [DB/OL]. (2010-12-20) [2011-2-02]. <http://dsp.rice.edu/cs/>.
- [ 13 ] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 589-609.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Donoho D. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [ 16 ] Comaniciu D, Meer P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [ 17 ] Xu L Z, Stoica P, Jian Li. A diagonal growth curve model and some signal processing applications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(9): 3363-3371.
- [ 18 ] Goodman J W. Some fundamental properties of speckle [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1976, 66(11): 1145-1150.
- [ 19 ] Hebar M, Gleich D, Cucej Z. Autobiomial model for SAR image despeckling and information extraction [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(8): 2818-2835.