



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
08
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



北魏



隋



初唐

数字文化遗产研究 P968

综述

尺度不变特征变换算子综述

刘立, 詹茵茵, 罗扬, 刘朝晖, 彭复员 885

图像处理和编码

改进的H.264帧间模式选择算法

任克强, 张旭光, 罗会兰 893

均质雾天下摄像机动态标定的车速估计

宋洪军, 陈阳舟, 郜园园 901

基于人脸五官特征的空域差错掩盖算法

张江鑫, 谢晋, 邝万坤 913

采用圆谐-傅里叶矩的图像区域复制粘贴篡改检测

秦娟, 李峰, 向凌云, 殷荏茗 919

图像分析和识别

基于视频感知哈希的视频篡改检测与多粒度定位

朱映映, 文振焜, 杜以华, 邓良太 924

视觉注意模型的道路监控视频关键帧提取

刘云鹏, 张三元, 王仁芳, 张引 933

格拉斯曼流形上的半监督判别分析

姜伟, 陆瑶, 杨炳儒 944

精神疲劳实时监测中多面部特征时序分类模型

陈云华, 张灵, 丁伍洋, 严明玉 953

图像分类中的概率乘积核函数

杨赛, 赵春霞 961

轮廓整体结构约束的壁画图像相似性度量

唐大伟, 鲁东明, 杨冰, 许端清 968

应用色彩空间聚类方法实现道路建模

向宸薇, 王拓, 于舰 976

图像理解和计算机视觉

杂乱背景和摄像机移动下的时空兴趣点检测

刘长红, 陈勇, 王明文 982

形状和颜色混合不变量在图像检索中的应用

公明, 曹伟国, 李华 990

计算机图形学

结合统计分类和边缘特征的最优视图提取

潘翔, 陈敖, 章国栋 1004

医学图像处理

局部熵驱动下的脑MR图像分割与偏移场恢复耦合模型

张建伟, 杨红, 陈允杰, 方林, 詹天明 1011

改进的模糊聚类亚实质肺结节3维分割

李翠芳, 聂生东, 王远军, 孙希文, 郑斌 1019

遥感图像处理

高光谱海岸带区域分割的活动轮廓模型

王相海, 金弋博 1031

改进的基于非局部均值的极化SAR相干斑抑制

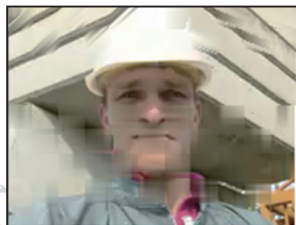
赵忠民, 赵拥军, 牛朝阳 1038

小波变换和稀疏表示相结合的遥感图像融合

刘婷, 程建 1045

《中国图象图形学报》论文摘要写作要求

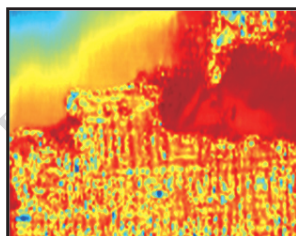
1054



基于人脸五官特征的空域差错掩盖算法 (第913页)



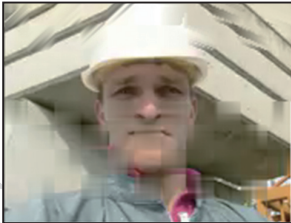
应用色彩空间聚类方法实现道路建模 (第976页)



改进的基于非局部均值的极化SAR相干斑抑制 (第1038页)

CONTENTS

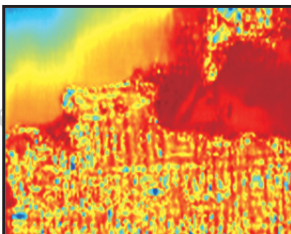
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Spatial error concealment algorithm based on the facial features (P913)



Road modeling using color spatial clustering (P976)



Improved polarimetric SAR speckle filter based on non-local means (P1038)

Review

Summarization of the scale invariant feature transform

Liu Li , Zhan Yinyin, Luo Yang, Liu Chaohui, Peng Fuyuan 885

Image Processing and Coding

Improved inter frame mode selection algorithm for H.264

Ren Keqiang, Zhang Xuguang, Luo Huilan 893

Vehicle velocity estimation based on camera calibration under homogenous fog

Song Hongjun, Chen Yangzhou, Gao Yuanyuan 901

Spatial error concealment algorithm based on the facial features

Zhang Jiangxin, Xie Jin, Kuang Wankun 913

Detection of image region copy-move forgery using radial harmonic Fourier moments

Qin Juan, Li Feng, Xiang Lingyun, Yin Changming 919

Image Analysis and Recognition

Video forgery detection and multi-granularity location based on video perceptual hashing

Zhu Yingying, Wen Zhenkun, Du Yihua, Deng Liangtai 924

Key frame extraction based on the visual attention model for lane surveillance video

Liu Yunpeng, Zhang Sanyuan, Wang Renfang, Zhang Yin 933

Semi-supervised discriminant analysis on Grassmannian manifold

Jiang Wei, Lu Yao, Yang Bingru 944

Time-series classification model based on multiple facial feature for real-time mental fatigue monitoring

Chen Yunhua, Zhang Ling, Ding Wuyang, Yan Mingyu 953

Probability product kernels in image classification

Yang Sai, Zhao Chunxia 961

Similarity metrics between mural images with constraints of the overall structure of contours

Tang Dawei, Lu Dongming, Yang Bing, Xu Duanqing 968

Road modeling using color spatial clustering

Xiang Chenwei, Wang Tuo, Yu Jian 976

Image Understanding and Computer Vision

Spatio-temporal interest point detection in cluttered backgrounds with camera movements

Liu Changhong, Chen Yong, Wang Mingwen 982

Application of combined shape and color invariants to image retrieval

Gong Ming, Cao Weiguo, Li Hua 990

Computer Graphics

Best view selection based on statistical classification and edge features

Pan Xiang, Chen Ao, Zhang Guodong 1004

Medical Image Processing

Brain MR image segmentation and bias correction model based on local entropy

Zhang Jianwei, Yang Hong, Chen Yunjie, Fang Ling, Zhan Tianming 1011

Segmentation of sub-solid pulmonary nodules based on improved fuzzy

C-means clustering

Li Cuifang, Nie Shengdong, Wang Yuanjun, Sun Xiwen, Zheng Bin 1019

Remote Sensing Image Processing

The active contour model for segmentation of coastal hyperspectral remote sensing image

Wang Xianghai, Yin Yibo 1031

Improved polarimetric SAR speckle filter based on non-local means

Zhao Zhongmin, Zhao Yongjun, Niu Chaoyang 1038

Remote sensing image fusion with wavelet transform and sparse representation

Liu Ting, Cheng Jian 1045

中图法分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)08-1038-07

论文引用格式: 赵忠民, 赵拥军, 牛朝阳. 改进的基于非局部均值的极化 SAR 相干斑抑制[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(8): 1038-1044.
[DOI:10.11843/jig.20130819]

改进的基于非局部均值的极化 SAR 相干斑抑制

赵忠民, 赵拥军, 牛朝阳

信息工程大学导航与空天目标工程学院, 郑州 450002

摘要: 贝叶斯形式的非局部均值模型在极化 SAR 图像相干斑抑制中有良好的应用, 在实现抑制相干斑的同时较好地保持了边缘细节和点目标。通过分析合成孔径雷达 (SAR) 图像多视数据的空间统计分布, 结合贝叶斯形式的非局部均值模型, 得出在该模型下多视与单视 SAR 图像中像素间相似性度量函数一致性的结论, 并对该相似性度量函数进行了修正, 使之满足对称性; 最后针对算法全局使用一个固定滤波参数影响滤波效果的问题, 提出一种根据像素间相似程度自适应选取滤波参数的方法。实验结果验证了本文算法的有效性。

关键词: 极化 SAR; 相干斑抑制; 非局部均值; 相似性度量; 滤波参数

Improved polarimetric SAR speckle filter based on non-local means

Zhao Zhongmin, Zhao Yongjun, Niu Chaoyang

Navigation and Aerospace Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: The Bayesian non-local means filter is adapted to the polarimetric synthetic aperture radar (SAR) multiplicative speckle noise, which effectively reduces the speckle noise while keeping the details. Through analyzing the speckle statistics of multi-look SAR images combined with Bayesian non-local means filter, we conclude that the similarity function in the multi-look SAR image is according to that of the single-look SAR image, which is proved in this paper. Then, a new amended similarity function is proposed. Finally, an adaptive filtering parameter selection method is proposed based on similarity between pixels to solve the problem that a fixed parameter could influence the filter performance. The proposed method is validated on real polarimetric SAR images through comparisons with the original algorithm.

Key words: polarimetric synthetic aperture radar (SAR); despeckling; non-local means; similarity function; filtering parameter

0 引言

相干斑是所有相干成像系统所固有的原理性缺陷, 相干斑的出现影响了合成孔径雷达 (SAR) 图像的质量, 使得 SAR 图像的辐射分辨率明显变差, 同时降低了 SAR 图像的空间分辨率^[1]。对于极化 SAR, 相干斑噪声还影响目标极化散射特性的获取, 给极化数据后续的目标检测、识别和分类等工作带

来困难, 因此相干斑抑制是极化 SAR 图像预处理的重要工作^[2]。其中有代表性的极化 SAR 相干斑抑制方法有基于极化域的极化白化滤波 (PWF)^[3] 和空域的精制极化 Lee 滤波^[4] 等算法, 这些算法中参数的计算本质上都是将当前像素点与邻域像素点 (非矩形窗^[4]、自适应窗^[5] 等) 的加权平均作为该点的估计值, 缺陷是在去除相干斑的同时也会平滑图像的边缘细节信息。

上述方法大都是基于局部或半局部计算模型,

收稿日期: 2012-06-18; 修回日期: 2012-12-17

第一作者简介: 赵忠民 (1987—), 男, 解放军信息工程大学导航与空天目标工程学院信号与信息处理专业硕士研究生, 主要研究方向为极化 SAR 相干斑抑制技术。E-mail: 476708986@qq.com

忽略了图像的结构信息,而非局部均值算法的基本原理就是利用图像块的相似性作为均值滤波的加权权重,可以很好地保持图像的纹理信息^[6]。原始的非局部均值算法用欧氏距离来度量相似性,适用于加性噪声,对于 SAR 图像中的乘性斑点噪声,则需要寻找新的相似性度量函数。钟桦通过分析贝叶斯形式的非局部均值模型^[7],结合单视 SAR 图像的回波功率分布特性,得到了新的相似性度量函数,从而提出了 SAR 图像相干斑抑制的非局部均值滤波算法^[8],并参照精制极化 Lee 滤波的思路将此算法扩展到极化 SAR 相干斑抑制中^[9]。

在分析多视 SAR 图像的空间统计分布的基础上,结合贝叶斯形式的非局部均值模型,证明了在该模型下多视数据与单视数据得到的相似性度量函数的一致性,从而扩展了贝叶斯形式的非局部均值模型的应用范围,并对该模型下得到的相似性度量函数进行了修正,使之满足对称性。另外原非局部均值算法在整幅图像使用单一滤波参数 h 影响了滤波性能,本文从权值函数出发,提出一种根据像素间相似程度自适应选取滤波参数的改进算法。实验结果表明,本文算法在保持图像细节信息的同时,明显提高了相干斑抑制能力,达到了更好的滤波效果。

1 基于非局部均值的相干斑抑制算法

非局部均值算法的思想是利用图像中结构间的自相似性来恢复原始图像,其滤波形式为^[6]

$$\hat{z}(x) = \frac{1}{C(x,y)} \sum_{y \in \Omega} w(x,y) z(y) \quad (1)$$

式中 $\hat{z}(x)$ 为像素 x 的滤波结果, $w(x,y)$ 为加权重值函数,由中心像素 x 和参与估计的像素 y 之间的相似性度量函数 $d(x,y)$ 决定,即

$$w(x,y) = \exp\left(-\frac{d(x,y)}{h^2}\right) \quad (2)$$

式中, h 为滤波参数, $C(x,y) = \sum_{y \in \Omega} w(x,y)$ 为归一化函数, Ω 为像素 y 的采样区间,称为搜索窗。

非局部均值算法的一个关键问题是像素间的相似程度的计算,对于自然图像中的加性噪声模型,可以用欧氏距离度量像素间的相似性,而如果直接将它推广到 SAR 图像的降斑并不能很好地反映 SAR 图像的结构信息,因此对于 SAR 图像中乘性斑点噪声需要寻找新的相似性度量函数。贝叶斯形式的非局部均值模型从图像像素值的统计分布出发,回避了噪声

模型问题,在 SAR 图像相干斑抑制中有良好的应用。

当采用二次型损失函数(即均方误差函数)时,未知参数 $u(x)$ 的贝叶斯估计是给定观测样本 $z(x)$ 时参数 $u(x)$ 的条件期望^[10],即

$$\hat{u}(x) = \sum_{u(x) \in \Omega} p(u(x) | z(x)) u(x) \quad (3)$$

式中, $p(u(x) | z(x))$ 是给定观测样本(即原始数据)情况下真实值 $u(x)$ 的后验分布密度函数。

对于 SAR 图像中的乘性斑点噪声模型

$$z = u \cdot n \quad (4)$$

式中, z 和 u 分别表示为实际像素值(含相干斑噪声)和理想像素值(无噪), n 为相干斑噪声。因为 $u(x)$ 为理想真实值,不可能得到,如果用样本 $z(y)$ (即中心像素 $z(x)$ 周围的实际含有相干斑噪声的像素值)代替理想的像素值 $u(x)$,并将式(3)全概率公式展开,可以得到

$$\hat{z}(x) = \frac{\sum_{u(x) \in \Omega} p(z(x) | z(y)) p(z(y)) z(y)}{\sum_{u(x) \in \Omega} p(z(x) | z(y)) p(z(y))} \quad (5)$$

如果将 $w(x,y) = \sum_{u(x) \in \Omega} p(z(x) | z(y)) p(z(y))$,

那么式(5)就变为式(1)所示的非局部均值公式,因此也将式(5)称之为贝叶斯形式的非局部均值模型^[7]。假设搜索窗内像素 $z(y)$ 分布一致,由式(5)可以看出只需求出条件分布 $p(z(x) | z(y))$ 就可以得到加权重 $w(x,y)$,文献[8]根据单极化单视回波功率服从负指数分布,结合贝叶斯形式的非局部均值模型,推出了 SAR 图像中像素间的相似度函数

$$d(x,y) = \sum_{m=1}^M \left(\frac{z_m(x)}{z_m(y)} + \ln z_m(y) \right) \quad (6)$$

式中, $z_m(x)$ 为中心像素 $z(x)$ 对应邻域窗中第 m 个像素, $z_m(y)$ 为搜索窗像素 $z(y)$ 对应邻域窗中第 m 个像素, M 为像素邻域窗口中元素的个数。

2 改进的非局部均值算法

2.1 贝叶斯形式的非局部均值模型的扩展

在文献[9]中,SAR 图像像素间的相似性度量函数是根据单视数据服从负指数分布结合贝叶斯形式的非局部均值模型得到的,多视处理是一种常见的相干斑抑制方法,而且单视处理可以看成多视处理的一种特殊情况,所以从多视数据的统计分布出发求得像素间的相似性度量函数更具有一般性。多视数据模型不再是负指数分布,而是服从 Gamma 分布^[1],即

$$p(I) = \frac{L}{p_s \Gamma(L)} \left(\frac{LI}{p_s} \right)^{L-1} \exp\left(-\frac{LI}{p_s}\right) \quad (7)$$

式中, I 是图像的像素值, p_s 是对应的平均值, L 是多视处理的视数, 如果 $L=1$ 则式(7)简化为单视数据对应的负指数分布, 所以由负指数分布得到的像素间相似性度量函数在 Gamma 分布下不一定适用, 如果直接应用必须证明其合理性。

由式(5)可以看出, 假设搜索窗内元素 $z(y)$ 分布一致, 只需求出 $p(z(x)|z(y))$ 就可以得到加权重 $w(x, y)$ 。参照文献[9]的步骤, 由式(7)得到的条件分布为

$$p(z(x)|z(y)) = \frac{L}{z(y) \Gamma(L)} \left(\frac{L \cdot z(x)}{z(y)} \right)^{L-1} \times \exp\left(-\frac{L \cdot z(x)}{z(y)}\right) \quad (8)$$

由于像素间的相似性是由各个邻域窗口比较得到, 所以式(8)可以写为

$$\begin{aligned} p(z(x)|z(y)) &= \prod_{m=1}^M (p(z_m(x)|z_m(y))) = \\ &= \frac{L^M}{\Gamma(L)^M} z(x)^{(L-1)M} \times \\ &\exp\left(-\sum_{m=1}^M \left(\frac{L \cdot z_m(x)}{z_m(y)} + L \cdot \ln z_m(y)\right)\right) = \\ &= \frac{L^M}{\Gamma(L)^M} z(x)^{(L-1)M} \exp(-L) \times \\ &\exp\left(-\sum_{m=1}^M \frac{z_m(x)}{z_m(y)} + \ln z_m(y)\right) \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入到式(5)后, 归一化函数可以将式(5)中含视数 L 的项约掉, 即可证明相似性度量函数与视数 L 无关, 从而得到 Gamma 分布下得到的像素间相似性度量函数与式(6)一致性的结论。

2.2 相似性度量函数的改进

从式(6)可以看出, 该相似性度量函数不满足对称性, 当像素 x 为中心与像素 y 的相似度 $d(x, y)$ 和像素 y 为中心与像素 x 的相似度 $d(y, x)$ 不相等, 这与事实不符, 所以式(6)并不能准确地反映出像素间的相似程度。针对这一问题, 在式(6)的基础上, 提出一种改进的相似性度量函数

$$d(x, y) = \frac{\sum_{m=1}^M \left(\frac{z_m(x)}{z_m(y)} + \ln z_m(y) + \frac{z_m(y)}{z_m(x)} + \ln z_m(x) \right)}{2} \quad (10)$$

另外式(6)或式(10)中当 $x=y$ 时, 如果图像中的某些像素点的邻域结构在搜索窗内找不到与其相

似的子块, 那么其滤波后的像素值几乎不会变化, 会造成过加权的现象, 针对这一问题, 进行以下处理

$$d(x, x) = \min(d(x, y)), \forall x \neq y \quad (11)$$

以上改进可以很好地解决对称度量和过加权问题, 但是也会使得某些亮点目标在滤波过程中被周围像素弱化, 影响某些点目标的保持, 所以需要在滤波前添加点目标检测的步骤来保证点目标过度平滑。

2.3 自适应选取滤波参数

滤波参数 h 在非局部均值算法中起着十分关键的作用, 控制着对噪声的平滑程度: 当 h 大时权重 w 比较大, 最后加权平均的结果使得去噪效果比较光滑; 当 h 小时权重 w 比较小, 其细节保留程度比较高。原始的非局部均值算法整幅图像采用固定的滤波参数, 这会出现图像中的某些像素点过渡平滑, 而对另外一些像素点滤波不充分的问题。对于一幅图像, 不可能找到一个全局最优的滤波参数, 使其对图像中各个部分都能取得很好的去噪效果, 所以说在贝叶斯形式的非局部均值模型中, 给出的一个滤波参数的经验值 3σ 实质上只是相干斑抑制和边缘细节保持之间的折中, 并没有很好地解决两者之间的矛盾。因此, 用一种自适应选取滤波参数的方法代替固定参数滤波更为合理。

从式(2)可知, 加权重由像素间的相似性度量函数和滤波参数的比值决定。对于图像中不同的像素点, 像素间的距离函数一般也服从不同的分布, 而滤波参数 h 控制着距离函数在加权重计算中的参与程度, 所以滤波参数的选取应该与像素间的相似性度量函数有关^[11]。另外, 还需要考虑搜索窗内不同像素与中心像素距离函数对滤波参数的影响: 假如与中心像素相似程度高即距离函数小, 应赋予一个大的滤波参数, 以使得它更大程度地参与加权重度的计算, 反之则选择一个小的滤波参数, 以进一步减少它在加权平均过程中对中心像素的影响。综合考虑以上两点, 给出自适应选取滤波参数的方法。

可以看出式(11)是搜索窗内除中心像素本身外与它最近的距离函数, 这里的像素 y 是与中心像素 x 最相似的点, 它们应该属于同一区域, 所以式(11)可以认为是中心像素与它所处同质区域中像素的距离函数, 由此将式(11)作为判断搜索窗像素与中心像素冗余性的标准, 并给出滤波参数与相似性度量函数的关系。首先以搜索窗内各个像素点与中心像素距离小于 λ 倍的 $d(x, x)$ 为标准将搜索窗内元素分为两类: 冗余性大的像素点和冗余性小

的像素点。

像素点 $y \in$

$$\begin{cases} \text{冗余性大的像素点} & d(x, y) \leq \lambda d(x, x) \\ \text{冗余性小的像素点} & d(x, y) > \lambda d(x, x) \end{cases} \quad (12)$$

然后对两类像素点赋予不同的滤波参数处理

$$h = \begin{cases} \lambda_1 \sqrt{\text{abs}(d(x, x))} & \text{冗余性大的像素点} \\ \lambda_2 \sqrt{\text{abs}(d(x, x))} & \text{冗余性小的像素点} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\lambda_1 > \lambda_2$, 以使得跟中心像素相似程度高的元素对应大的滤波参数。需要注意的是多视数据中 $d(x, x)$ 会出现小于 0 的情况, 所以式(13)中取 $d(x, x)$ 的绝对值。由式(13)可以看出滤波参数受像素间的相似性度量函数的控制, 使得搜索窗内元素可以根据与中心像素的相似程度自适应选取滤波参数, 避免了全局使用一个固定滤波参数造成滤波效果下降的问题。

2.4 改进的非局部均值算法流程

采用式(10)作为距离函数度量像素间的相似性, 并根据搜索窗内像素与中心像素的相似程度来自适应选取滤波参数。本文算法的具体实现步骤如下:

1) 在总功率(SPAN)图像上以像素 x 为中心确定 21×21 大小的搜索窗 Ω , 邻域窗的大小为 7×7 。

2) 将搜索窗内像素从小到大排列, 取出其第 t ($t=0.98N$, N 为图像像素总数) 个像素值 k_1 , 用 3×3 大小的滑动窗对搜索窗内像素扫描, 计算滑动窗内像素值大于值 k_1 的个数 T , 当 T 大于 5 时, 将此 3×3 区域视为亮点目标区域, 保留原值不作滤波处理^[12]。

3) 在搜索窗内滑动邻域窗, 计算搜索窗内元素与中心像素 x 间的相似度:

(1) 如果 $y \in \Omega$ 且 $y \neq x$, 由式(10)计算像素 y 与中心像素之间的相似性;

(2) 中心像素与本身的距离函数由式(11)得到。

4) 对搜索窗内所有元素由式(12)判断其冗余性, 然后根据式(13)计算该元素参与平均的加权权重 $w(x, y)$ 。

5) 对整个极化协方差矩阵进行滤波, 滤波形式如式(1), 此时的 $z(x)$ 和 $z(y)$ 代表的是各个元素所对应的极化协方差矩阵。

3 实验结果及分析

衡量一种极化滤波算法的优劣, 除了主观的

视觉效果以外, 还需要一些客观的评价指标进行定量的分析和比较, 常用的极化 SAR 图像相干斑抑制算法评价指标有: 用等效视数(ENL)和相干斑指数(β)衡量同质区域的相干斑抑制效果^[13], 视数越大, 相干斑指数越小, 降斑效果越好; 另外图像标准差代表了图像区域所有像素点偏离均值的程度, 反映图像的不均匀性, 标准差应随着相干斑的降低而减小^[13]; 用边缘增强指数(EEI)来衡量边缘保持能力^[14], 滤波后 EEI 值越大, 说明边缘锐化效果越好; 最后用极化数据经过 Cloude 分解来比较各个滤波算法对极化信息保持的影响。

实验单视数据使用的是德国空间研究局(DLR)研制开发的 Do-228 平台 ESAR 机载图像, 实验截取图像大小为 500×500 像素, 区域中有机场跑道、草地、稻田等目标; 多视数据为 NASA/JPL 实验室 AIRSAR 系统获取的 L 波段旧金山极化 SAR 数据, 实验截取图像大小为 500×500 像素, 区域中有城市、海洋、大桥等目标。图 1 和图 2 分别列出了测试数据经过各种算法处理后的 Pauli 分解的极化伪彩色合成图对比结果。 h 为滤波参数, $h = 4\sigma$ (σ 为 ESAR 和 AIRSAR 的 SPAN 图像的噪声标准差)。

选取图 1(a)中方框 Z1 和图 2(a)中 Z3 对应的区域计算各种算法滤波后图像的等效视数和极化差异度, 选取椭圆 S1 和 S2 选中的区域衡量边缘保持能力。由于使用了带边缘检测的非方形窗口, 精制极化 Lee 滤波后如图 1(b) 和图 1(f) 所示匀质区域出现灰度变化, 视觉效果不好, 而且在图 2(f) 中 S2 所对应边缘也没有起到锐化边缘的作用, 由此可以看出精制极化 Lee 滤波算法并没有很好地完成相干斑抑制和边缘保持的任务。对比图 1(b)(c) 和图 2(b)(c) 可以看出, 非局部均值算法滤波后匀质区域得到平滑, 抑制了相干斑噪声, 表 1 中的等效视数和相干斑指数等客观评价指标有较大幅度的提高, 同时边缘细节也得到了锐化, 但是由于像素间的相似性度量函数不对称, 使得滤波后图像的匀质区域如图 1(g) 中 Z3 所对应区域失真, 甚至出现了假的点目标, 影响对图像的判读, 另外原始的非局部均值算法使用固定的滤波参数, 并不能很好地同时兼顾相干斑抑制和边缘保持: 滤波参数 $h = 4\sigma$ 时, 匀质区域滤波后不够平滑, 影响视觉效果, 但取更大的值会模糊边缘细节, 如果滤波参数过大边缘区域甚至会出现重影现象。

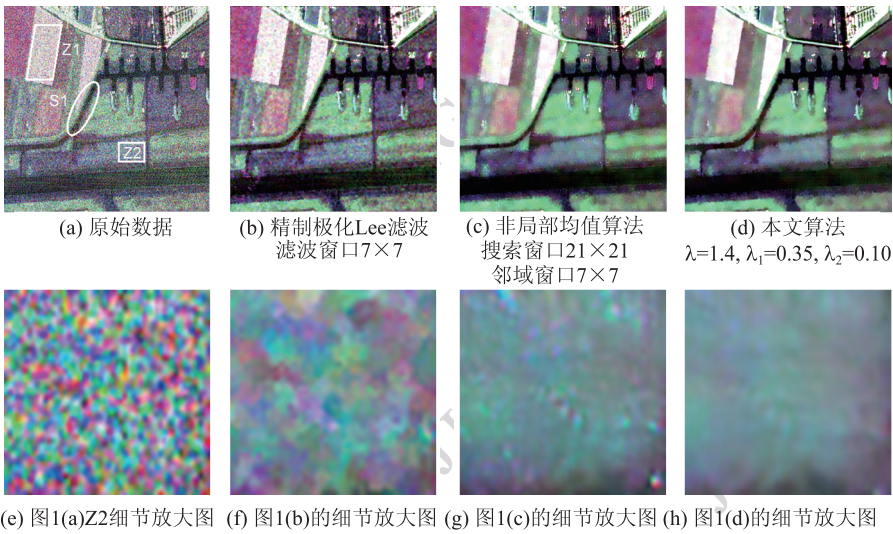


图1 单视数据 Pauli 分解的 RGB 合成图

Fig. 1 RGB images of Pauli decomposition based on single-look data

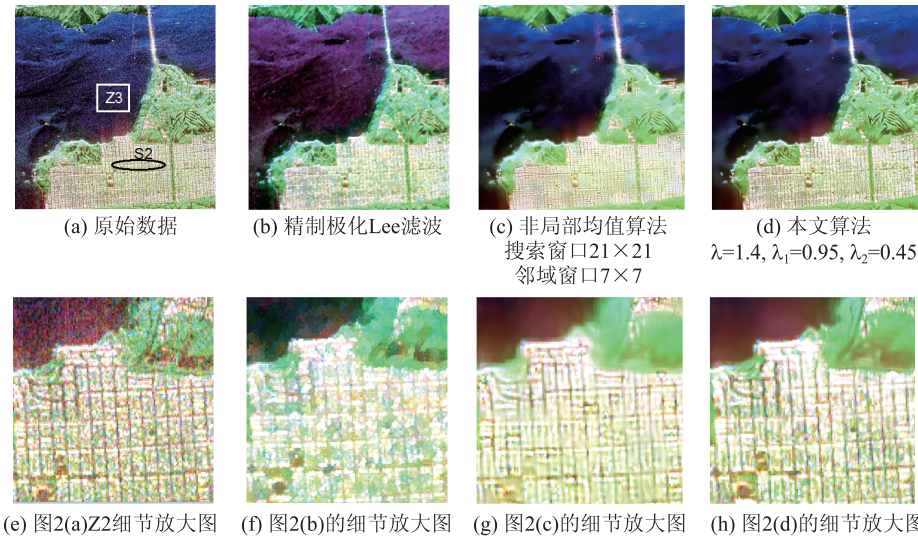


图2 多视数据 Pauli 分解的 RGB 合成图

Fig. 2 RGB images of Pauli decomposition based on multi-look data

表1 等效视数、边缘保持指数等指标的对比

Table 1 Comparison of ENL、EPI and
etc based on different algorithms

评价标准	滤波前	精制极化 Lee 滤波	非局部 均值算法	本文 算法
ENL(Z1)	1.91	9.38	27.13	43.89
ENL(Z3)	2.68	15.73	44.93	53.43
$\beta(Z1)$	0.723 6	0.326 4	0.192 0	0.150 9
$\beta(Z3)$	0.610 8	0.336 1	0.149 2	0.136 8
标准差(图 1)	63.04	26.81	12.24	8.83
标准差(图 2)	1.24	1.01	0.98	0.62
EEI(S1)	1	1.113 5	1.117 8	1.132 6
EEI(S2)	1	0.922 0	1.172 6	1.286 5

对比图 1(c)(d)和图 2(c)(d)可以看出,本文算法滤波后匀质区域相干斑抑制效果明显,图 1(h)的视觉效果也足够平滑,较好地实现了对相干斑噪声的抑制,从表 1 等效视数和相干斑指数的比较也可以看出,本文算法相干斑抑制能力有较大提升;对比图 2(g)(h),本文算法滤波后城市等纹理特征更加清晰,表 1 中本文算法的边缘增强指数较之原非局部均值算法有一定的提高;另外从表 1 图像标准方差看,本文算法滤波后图像的像素点聚集程度最好,说明图像的相干斑抑制得最明显。综合分析可以说明使用改进的相似性度量函数可以更为准确地度量像素间的相似程度,同时在利用相似性度量函数计算加权权重

的过程中自适应选取滤波参数可以进一步解决相干斑抑制和边缘保持之间的矛盾,在对匀质区域实现相干斑抑制的同时较好地保留了图像的边缘细节。

将相干矩阵进行 Cloude 分解可以得到两个很有用的参数: 散射熵 H 和平均角 α , 以多视数据为例, 图 3 给出了各种算法滤波后 H 和 α 这两个参数的图像, 其中图 3(a) — (d) 为平均角 α 的图像, 图 3(e) — (h) 为散射熵 H 的图像。由图 3(a) (e) 可以看到原始图像几乎没有轮廓, 得到极化参数相当分散, 最大熵值为 0.944 6; 由图 3(f) 可以看到精制极化 Lee 滤波后图像有大致轮廓, 熵值有一定的提高 (最大熵值为 0.951 8), 但是细

节部分模糊, 效果不够理想; 由图 3(g) 可以看到经过非局部均值算法滤波后图像相对清晰, 最大熵值为 0.984 1, 海洋、森林、城区等地物的散射熵也相对集中, 但城市街道之间出现了过多的奇异点, 图 3(c) 平均角图像也没有明显的优势, 说明原非局部均值算法后数据不能够全面的提取极化信息; 对比图 3(c) (d) 可以看到本文算法平均角图像有明显的轮廓, 对比图 3(g) (h) 可以看出本文算法城区部分更加清晰, 最大熵值为 0.993 1。综合比较可以看出本文算法滤波后数据更能体现地物的散射特性, 为后续的极化处理提供了更好的基础。

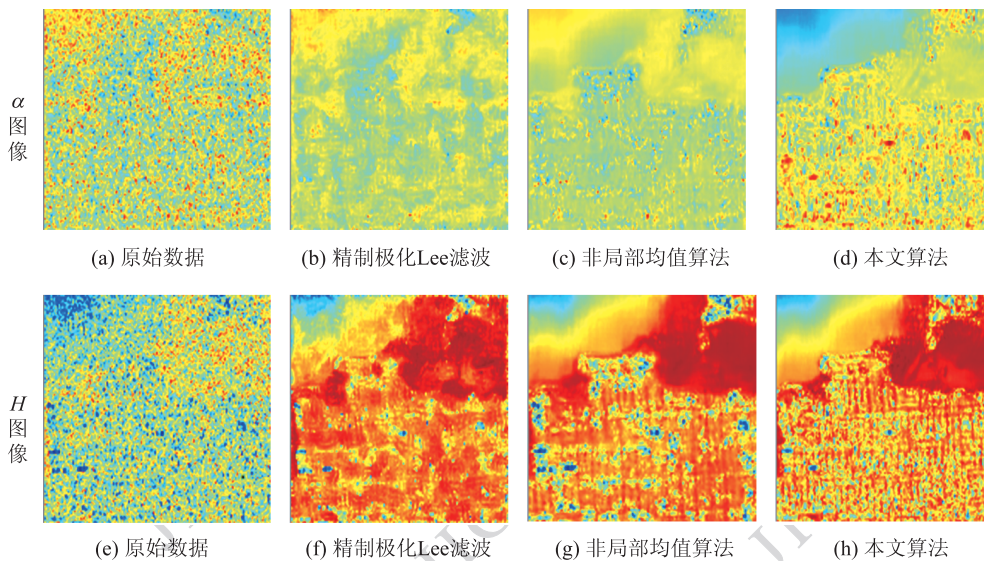


图 3 多视数据 Cloude 分解的图像

Fig. 3 Images of Cloude decomposition based on multi-look data

4 结 论

在分析贝叶斯形式的非局部均值模型的基础上, 扩展了该模型在极化滤波中的应用, 并针对该模型下得到的像素间相似性度量函数不满足对称性的问题提出了一种新的距离函数, 最后, 从加权权重函数出发, 提出了一种根据像素间相似程度自适应选取滤波参数的方法。实验结果表明, 本文算法克服了原始非局部算法相似性度量和滤波参数方面存在的缺点, 通过滤波后数据 Cloude 分解的具体评估可以看到该算法较好地保持了极化信息, 并在保持边缘细节信息的同时明显改善了相干斑抑制效果。

参考文献 (References)

- [1] Pi Y M, Yang J Y. Synthetic Aperture Radar Imaging Theory [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2007: 156-158. [皮亦鸣, 杨建宇. 合成孔径雷达成像原理 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007: 156-158.]
- [2] Lee J S. Polarimetric Radar Imaging-From Basics To Applications [M]. Florida: CRC Press, 2009: 160-164.
- [3] Leslie M, Novak, Michael C Burl. Optimal speckle reductions in polarimetric SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic, 1990, 26(2): 293-305.
- [4] Lee J S. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 38(5): 1038-1040.
- [5] Jiang Y, Zhang X L, Shi J. Speckle reduction for polarimetric

- SAR images by improved Lee filter [J]. Journal of Electronic Science and Technology University, 2009, 38(1):5-8. [江勇, 张晓玲, 师君. 极化 SAR 改进 Lee 滤波相干斑抑制研究[J]. 电子科技大学学报, 2009, 38(1):5-8.]
- [6] Buades A. Image and film denoising by non-local means [D]. Palma, Spain: Palma Universitat de les Illes Balears, 2006.
- [7] Pierrick C, Hellie P, Kervrann C. Bayesian nonlocal means-based speckle filtering [J]. IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Macro to Nano, 2008:1291-1294.
- [8] Zhong H, Li Y W, Jiao L C. Bayesian nonlocal means filter for SAR image despeckling [C] // Proceedings of the 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an, China: IEEE Conference Publications, 2009:1096-1099.
- [9] Wang S, Jiao L C, Li Y. A Polarimetric SAR Despeckling Algorithm Based on Bayesian Nonlocal Means; China, 10278051 [P]. 2010. [王爽, 焦李成, 李悦. 基于贝叶斯非局部均值的极化 SAR 数据的相干斑抑制方法: 中国, 10278051 [P]. 2010.]
- [10] Zhang X D. Modern Signal Preprocessing [M]. 2nd ed. Beijing: Qinghua University Press. 2002:45-48. [张贤达. 现代信号处理[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002:45-48.]
- [11] Sun W F, Pen Y H. An improved non-local means de-noising approach [J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(4):923-928. [孙伟峰, 彭玉华. 一种改进的非局部平均去噪方法[J]. 电子学报, 2010, 38(4):923-928.]
- [12] Li Y. Polarimetric SAR speckle denoising [D]. Xi'an: University of Xi'an Electronic Science and Technology, 2011. [李悦. 极化 SAR 相干斑噪声抑制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.]
- [13] Wang C, Zhang H, Chen X. Polarimetric Synthetic Aperture Radar Image Preprocessing [M]. Beijing: Beijing Science Press, 2007: 66-68. [王超, 张红, 陈曦. 全极化合成孔径雷达图像处理[M]. 北京: 北京科学出版社, 2007:66-68.]
- [14] Zhou X G, Kuang G Y, Wan J W. A review of polarimetric SAR speckle reduction [J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(3):377-385. [周晓光, 匡纲要, 万建伟. 多极化 SAR 图像斑点抑制综述[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(3):377-385.]