



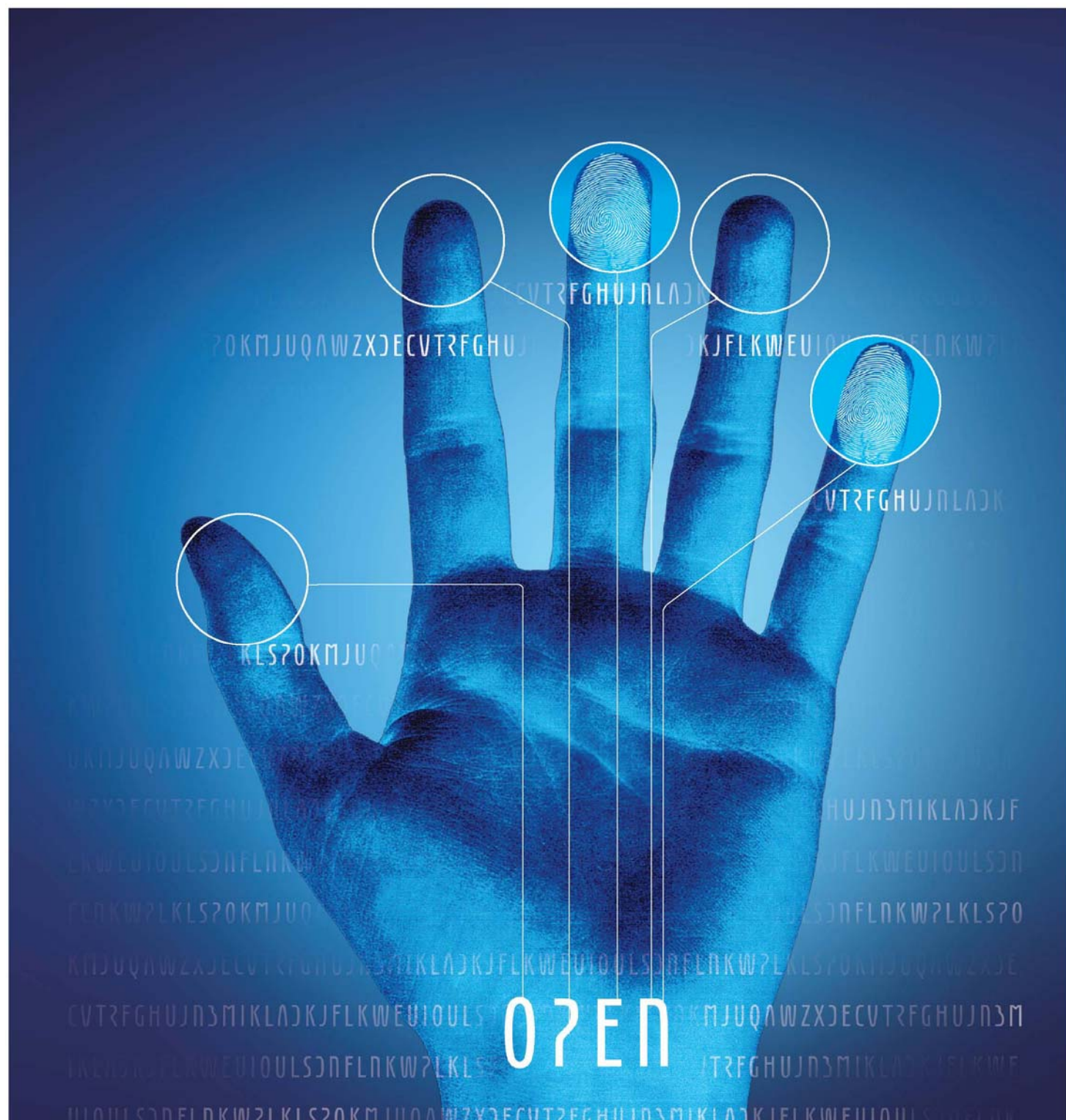
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

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
07
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB





第18卷第7期（总第207期）

2013年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。本刊所有图片均为非商业目的使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 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

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 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

广告经营许可证 京朝工商广字第0361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，邮政信箱：北京399信箱 邮编：100044）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.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, P.R.China)

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

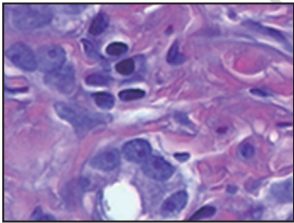
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

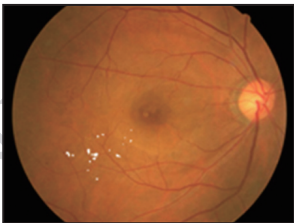
国内定价 50.00元



彩色纹理图像恢复的非局部TV模型 (第753页)



基于Nyström密度值逼近的减法聚类 (第790页)



RBF神经网络和阈值分割实现视网膜硬性渗出自动检测 (第859页)

图像处理 and 编码

各向异性的均衡化网状扩散模型 熊辉, 赖剑煌	731
特征提取和匹配的图像倾斜校正 钟金荣, 杜奇才, 刘炎, 林嘉宇	738
先进边界区分噪声检测的改进算法 祁冰露, 黄宴委, 陈少斌	746
彩色纹理图像恢复的非局部TV模型 端金鸣, 潘振宽, 台雪成	753
相似性约束的视频超分辨率重建 张义轮, 干宗良, 朱秀昌	761

图像分析和识别

低质量指纹图像方向场提取 卞维新, 徐德琴, 俞庆英	768
方向微分分块统计的运动模糊方向鉴别 李均利, 储诚曦	776
参数自适应的KPCA先验形状约束目标分割 沈霁, 李元祥, 周则明	783
基于Nyström密度值逼近的减法聚类 孙志海, 孔万增	790
空间目标检测序列图像中恒星目标抑制 黄宗福, 孙刚, 陈曾平	799

图像理解和计算机视觉

人体动作的超兴趣点特征表述及识别 王扬扬, 李一波, 姬晓飞	805
轮廓编组中的线索合并模型 王娇, 罗四维, 钟晶晶, 邹琪	813
全局图像特征分析与实时层次化消失点检测 孙愿, 卢鸿波, 张志敏	818
彩色图像特征捆绑的自动模型构建 徐洁, 邓红霞, 李海芳	829

计算机图形学

偏离映射的烙画风格绘制 钱文华, 徐丹, 岳昆, 官铮, 普园媛	836
点云模型法矢调整优化算法 孙金虎, 周来水, 安鲁陵	844

医学图像处理

基于惩罚最大似然优化模型的各向异性约束磁共振成像方法 邓梁, 史仪凯, 张均田	852
RBF神经网络和阈值分割实现视网膜硬性渗出自动检测 高玮玮, 沈建新, 王玉亮	859

遥感图像处理

衡量结构保持性能的SAR图像去噪质量评价 唐益明, 杨学志	866
地面LiDAR数据中建筑轮廓和角点提取 童礼华, 程亮, 李满春, 陈焱明, 王亚飞, 张雯	876

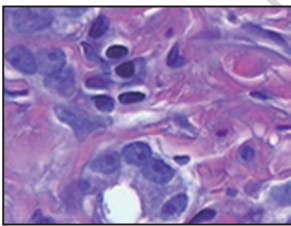
《中国图象图形学报》论文摘要写作要求	884
--------------------	-----

CONTENTS

JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Non-Local TV models for restoration of color texture images (P753)



Density value approximation for subtractive clustering based on Nyström method (P790)



Automatic detection of hard exudates based on RBF neural network and threshold segmentation (P859)

Image Processing and Coding

Equalized net diffusion model based on the anisotropy diffusion Xiong Hui, Lai Jianhuang	731
Robust method of skew correction based on feature points matching Zhong Jinrong, Du Qidai, Liu Ying, Lin Jiayu	738
Modification of advanced boundary discriminative noise detection algorithm Qi Binglu, Huang Yanwei, Chen Shaobin	746
Non-Local TV models for restoration of color texture images Duan Jinming, Pan Zhenkuan, Tai Xuecheng	753
Video super-resolution method based on similarity constraints Zhang Yilun, Gan Zongliang, Zhu Xiuchang	761

Image Analysis and Recognition

The orientation field extraction method for low quality fingerprints Bian Weixin, Xu Deqin, Yu Qingying	768
Identification of motion blur direction from motion blurred image by directional derivation and block statistics Li Junli, Chu Chengxi	776
Shape prior constrained KPCA object segmentation with parameter adaption Shen Ji, Li Yuanxiang, Zhou Zeming	783
Density value approximation for subtractive clustering based on Nyström method Sun Zhihai, Kong Wanzeng	790
Stellar targets suppression in image sequences for space targets detection Huang Zongfu, Sun Gang, Chen Zengping	799

Image Understanding and Computer Vision

Human action recognition based on super-interest points features Wang Yangyang, Li Yibo, Ji Xiaofei	805
Cue combination model for contour grouping Wang Jiao, Luo Siwei, Zhong Jingjing, Zou Qi	813
Hierarchical real-time vanishing point detection based on holistic image feature Sun Yuan, Lu Hongbo, Zhang Zhimin	818
Construction of the automatic model for feature binding of color image Xu Jie, Deng Hongxia, Li Haifang	829

Computer Graphics

Rendering pyrography style painting based on deviation mapping Qian Wenhua, Xu Dan, Yue Kun, Guan Zheng, Pu Yuanyuan	836
Optimal algorithm for normal adjustment of point clouds Sun Jinhu, Zhou Laishui, An Luling	844

Medical Image Processing

Anisotropically constrained MR imaging based on penalized maximum likelihood optimality model Deng Liang, Shi Yikai, Zhang Juntian	852
Automatic detection of hard exudates based on RBF neural network and threshold segmentation Gao Weiwei, Shen Jianxin, Wang Yuliang	859

Remote Sensing Image Processing

Image quality assessment of SAR image despeckling for measuring structure-preserving capability Tang Yiming, Yang Xuezhi	866
Extraction of building contours and corners from terrestrial LiDAR data Tong Lihua, Cheng Liang, Li Manchun, Chen Yanming, Wang Yafei, Zhang Wen	876

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)07-0866-10

论文引用格式: 唐益明, 杨学志. 衡量结构保持性能的 SAR 图像去噪质量评价[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(7): 866-875. [DOI: 10.11834/jig.20130719]

衡量结构保持性能的 SAR 图像去噪质量评价

唐益明, 杨学志

合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009

摘要: 现有相关图像质量评价方法均不能恰当衡量合成孔径雷达(SAR)图像去噪的结构保持性能, 为此提出无参考的 IENLR (improved equivalent number of looks of ratio image) 评价方法。首先总结了已有的相关图像质量评价方法, 分析其在衡量结构保持性能方面的局限性。随后, 从比值图像的等效视数(ENLR)图像出发, 构造了新评价方法 IENLR 的计算公式, 并通过理论分析证明其为关于结构保持性能的基本单调、有界的函数, 且具有参数的可调节性。最后, 通过仿真实验进一步验证了 IENLR 的良好性能, 并且发现 IENLR 在衡量结构保持性能方面优于现有的相关质量评价方法。

关键词: 合成孔径雷达图像; 相干斑噪声; 图像去噪; 结构保持性能

Image quality assessment of SAR image despeckling for measuring structure-preserving capability

Tang Yiming, Yang Xuezhi

School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: Currently, related image quality assessment methods can not appropriately measure structure-preserving capability of synthetic aperture radar (SAR) image despeckling, to solve this problem a no-reference improved equivalent number of looks of ratio image (IENLR) assessment method is put forward. To begin with, related image quality assessment methods are reviewed, where their weaknesses to measure structure-preserving capability are investigated. Furthermore, from equivalent number of looks of ratio (ENLR) image as a point of departure, the computing formula of IENLR is constructed, meanwhile theory analyses prove that IENLR is a basically monotone, bounded function with regard to structure-preserving capability, and that IENLR is adjustable in the light of its parameter. Finally, simulated experiments further verify that IENLR is excellent and superior to other related image quality assessment methods from the viewpoint of measuring structure-preserving capability.

Key words: synthetic aperture radar (SAR) image; speckle noise; image despeckling; structure-preserving capability

0 引言

凭借全天时、全天候的独特优势, 合成孔径雷达

(SAR)在航空测量、航空遥感、军事侦察、卫星海洋观测、航天侦察、图像匹配制导等诸多方面有着极其重要的理论与应用价值^[1-2]。SAR 的相干成像系统可以生成比光学图像信息更丰富的高分辨率图像,

收稿日期: 2013-01-22; 修回日期: 2013-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(61203077, 41076120, 61070124, 61271381); 安徽省优秀青年科技基金项目(10040606Y09); 中国博士后科学基金项目(2012M521218); 中央高校基本科研业务费专项资金(2012HGXCX0001, 2012HGQC0011, 2012HGBZ0639)

第一作者简介: 唐益明(1982—), 男, 讲师, 2011 年于合肥工业大学获计算机应用技术专业博士学位, 主要研究方向为数字图像处理、模糊理论。E-mail: ymtang@hfut.edu.cn

然而,随之而来的相干斑噪声^[3]却阻碍了其发展,比如对于 SAR 图像的解译造成了一定的困难。

为了消除 SAR 图像的相干斑噪声,国内外学者提出了大量的去噪算法,比较著名的有 Lee 滤波^[4]、SRAD(speckle reducing anisotropic diffusion)^[5-6]、小波变换^[7-8]、非局部均值滤波^[9-10]等算法。对于这些去噪算法,一方面需要其消除相干斑噪声,另一方面需要其能够尽量保持图像的结构特征(主要体现为边缘和纹理)。

那么,如何度量结构特征的保持性能,自然就成为了一个极其重要的研究课题。目前与 SAR 图像去噪相关的图像质量评价方法主要有 MSE(mean-square error)^[11-12]及 S/MSE(signal-to-mean-square error ratio)^[13-14]、PSNR(peak signal-to-noise ratio)^[15-16]、EC(edge correlation index)^[17-18]、FOM(Pratt's figure of merit)^[19-20]、SSIM(structural similarity)^[21-22]、ENLR(equivalent number of looks^[23-24] of ratio image)等。

从衡量 SAR 图像去噪结构保持性能的角度而言,理想的图像质量评价方法应该满足如下特点:

1) 评价方法的计算公式应该是单调(或基本上单调)的函数,这里的单调性是对结构损失的程度而言的。即结构损失的程度越大,函数值应该越小;或言之,如果结构保持得越好,则函数值应该越大。

2) 评价方法的计算公式应该是有界的函数。即函数值落在某个区间内,且该区间的上下界应该具有合理的现实意义。

但是经过进一步的分析发现:现有的这些图像质量评价方法对于 SAR 图像去噪结构保持性能的度量都存在明显的不足,不能满足当前的需求(详见第 1 节)。

以上提及的 MSE、S/MSE、PSNR、EC、FOM、SSIM 都不能保持关于结构损失程度的单调性。相比而言,ENLR 相对较好,因为其能够基本保持与结构损失的单调性,但是其却是个无界的函数,会出现趋向无穷大的现象,这点显然是不能接受的。

为此,在 ENLR 的基础上,提出一个新的无参考的 SAR 图像去噪质量评价方法——IENLR(improved equivalent number of looks of ratio image)。该方法一方面保持了 ENLR 的优势(即能够基本保持关于结构损失程度的单调性),另一方面,IENLR 是个有界的函数,具有参数可调性,并且 IENLR 的值与肉眼观测效果基本一致。随后,通过定理证明和仿真实验验证了 IENLR 的优良性能,并发现其优于

现有的相关图像质量评价方法。

1 面向 SAR 图像去噪的相关图像质量评价方法综述

SAR 图像的相干斑噪声是一类乘性噪声,SAR 图像的基本模型为^[25]

$$y_i = x_i \times n_i \quad (1)$$

式中, y 为观察到的 SAR 图像(幅度格式), x 为 y 对应的无噪声参考图像, n 为相干斑噪声($i \in \{1, 2, \dots, N\}$, N 为图像像素的个数)。经过去噪,得到的图像是 u 。面向 SAR 图像去噪,相关图像质量评价方法主要有 S/MSE、FOM、EC、SSIM、ENLR 等。

1) S/MSE 是目前广泛应用的衡量图像主观质量的重要方法^[13-14],它反映图像信噪比的变化情况,其基本公式为

$$(S/MSE)/dB = 10 \lg \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - u_i)^2} \quad (2)$$

式中, $\sum_{i=1}^N (x_i - u_i)^2$ 正是 MSE 的公式。对于 S/MSE 以及 MSE 体系的其他方法,其考察的重点都是去噪的总体性能。一般而言,S/MSE 值越大,则去噪效果越好。但是,这类方法对图像的每个像素的灰度值进行综合计算,从而考察的是去噪的总体性能,自然没有特别考虑结构特征保持的问题。因此 S/MSE 以及 MSE 体系的其他方法(也包括 PSNR)都不适合作为衡量结构保持性能的评价方法。

2) FOM 主要是从边缘保持的角度出发,将边缘产生的误差、有效边缘的丢失以及边缘误判 3 个因素考虑在内^[19-20],其计算公式为

$$FOM = \frac{1}{\max\{N_{org}, N_{ds}\}} \sum_{i=1}^{N_{ds}} \frac{1}{1 + \alpha \times d_i^2} \quad (3)$$

式中, N_{org} 、 N_{ds} 分别为无噪声参考图像 x 和去噪后图像 u 对应的边缘图的边缘点个数, d_i^2 为去噪后图像中第 i 个边缘点到原始图像中离它最近的边缘点的欧氏距离。一般地, α 常取 1/9。容易知道 $FOM \in [0, 1]$ 。特别地,当 $FOM = 1$ 时,边缘检测的性能最佳。FOM 考虑到边缘的因素,但未考虑到纹理的问题,从而对结构特征的考虑并不全面。而更为重要的是边缘检测的精确性并不能说明结构保持的优越性。如果再考虑到 SAR 图像相干斑噪声的影响,则

更加增加了 FOM 的不确定性。

3) Sattar 提出的 EC 评价方法^[17], 其基本公式为

$$EC = \frac{\Gamma(\Delta x - \overline{\Delta x}, \Delta u - \overline{\Delta u})}{\sqrt{\Gamma(\Delta x - \overline{\Delta x}, \Delta x - \overline{\Delta x}) \times \Gamma(\Delta u - \overline{\Delta u}, \Delta u - \overline{\Delta u})}} \quad (4)$$

式中, $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 为相关函数: $\Gamma(x, u) = \sum_{i=1}^N x_i \cdot u_i$,

这里 $\Delta x, \Delta u$ 分别表示无噪声参考图像 x 和去噪后图像 u 的梯度值, $\overline{\Delta x}, \overline{\Delta u}$ 分别为相应的均值。EC 通过梯度的相关性来考察边缘的相关性^[18], 但是噪声对于梯度的影响较为显著, 使得该评价方法的性能有所下降。与 FOM 类似, 也不太适合来衡量去噪的结构保持性能。

4) SSIM 方法^[21-22] 通过结构相似性来进行图像质量的评价, 其基本表达式为

$$SSIM(x, u) = \frac{(2\mu_x \mu_u + C_1)(2\sigma_{xu} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_u^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_u^2 + C_2)} \quad (5)$$

式中, μ_x, μ_u 分别表示 x 和 u 的局部均值, σ_x, σ_u 为相应的局部标准差, σ_{xu} 为 x 和 u 之间的局部相关因子, C_1 和 C_2 一般取较小的常数。该方法依然是对整体性能的考察, 而且同样会受到噪声的扰动, 从而依然难以准确度量结构特征的保持情况。

5) 以上这些图像质量评价方法都是从无噪声参考图像与去噪图像之间的匹配程度出发的。从另一个角度, SAR 图像的比值图像^[26-27] 是衡量结构损失的重要方式, 其基本公式为

$$r_i = \frac{y_i}{u_i} \quad (6)$$

如果比值图像 r 看起来越像噪声, 则去噪性能越好。衡量图像噪声抑制程度的常用指标是等效视数 (ENL)^[23-24], 以此来衡量图像噪声的相对强度。比值图像的等效视数 ENLR 定义为

$$ENLR(r) = \frac{m^2}{s^2} \quad (7)$$

式中, m 和 s 分别是比值图像 r 的均值和标准差。当取得理想的去噪效果时, 比值图像应该仅含有相干斑噪声。经过研究, 发现 ENLR 能基本保持关于结构损失程度的单调性 (即在大多数情况下都是单调的)。但是, ENLR 方法依然存在较为明显的不足, 主要体现在: 当标准差较小的时候, ENLR 的值会显得过大, 甚至会出现接近无穷大的现象。因此 ENLR 是个无界的函数, 这显然是不可接受的。

2 IENLR 图像质量评价方法

在 ENLR 的基础上, 提出一种新的无参考的图像质量评价方法, 称为改进的 ENLR。

定义 1 对于比值图像 r , 定义 IENLR 的计算函数为

$$IENLR(r) = \frac{m^2}{m^2 + k \times s^2} \quad (8)$$

式中, k 为大于 0 的常数。

定义 1 中的参数 k 用以调控均值和标准差之间的关系, 同时也用来调整 IENLR 的函数值大小。

注意到 $m = s = 0$ 只在极端情况 (即 $r_i \equiv 0, i = 1, \dots, N$) 下出现 (一般不会发生)。为了方便, 以下均不考虑 $m = s = 0$ 的情形。

定理 1 对含噪图像 y , 若两次去噪后的比值图像分别为 r_1, r_2 , 则 $IENLR(r_1) \leq IENLR(r_2)$ 当且仅当 $ENLR(r_1) \leq ENLR(r_2)$ 。

证明 设 m_1 和 s_1 分别是 r_1 的均值和标准差, m_2 和 s_2 分别是 r_2 的均值和标准差。那么 $ENLR(r_1) = \frac{m_1^2}{s_1^2}$, $ENLR(r_2) = \frac{m_2^2}{s_2^2}$, 以及 $IENLR(r_1) = \frac{m_1^2}{m_1^2 + k \times s_1^2}$, $IENLR(r_2) = \frac{m_2^2}{m_2^2 + k \times s_2^2}$ 。

1) 先证明充分性。假设 $ENLR(r_1) \leq ENLR(r_2)$, 即 $\frac{m_1^2}{s_1^2} \leq \frac{m_2^2}{s_2^2}$, 从而

$$m_1^2 s_2^2 \leq m_2^2 s_1^2 \quad (9)$$

此外

$$\begin{aligned} IENLR(r_2) - IENLR(r_1) &= \frac{m_2^2}{m_2^2 + k \times s_2^2} - \frac{m_1^2}{m_1^2 + k \times s_1^2} = \\ &= \frac{m_2^2 \times (m_1^2 + k s_1^2) - m_1^2 \times (m_2^2 + k s_2^2)}{(m_2^2 + k s_2^2)(m_1^2 + k s_1^2)} = \\ &= \frac{k(m_2^2 s_1^2 - m_1^2 s_2^2)}{(m_2^2 + k s_2^2)(m_1^2 + k s_1^2)} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(9)(10)可得 $IENLR(r_2) - IENLR(r_1) \geq 0$, 即 $IENLR(r_1) \leq IENLR(r_2)$ 。

2) 其次再证明必要性。假设 $IENLR(r_1) \leq IENLR(r_2)$, 则 $IENLR(r_2) - IENLR(r_1) \geq 0$ 。结合式(10), 可得

$$\frac{k(m_2^2 s_1^2 - m_1^2 s_2^2)}{(m_2^2 + k s_2^2)(m_1^2 + k s_1^2)} \geq 0$$

则 $m_2^2 s_1^2 - m_1^2 s_2^2 \geq 0$, 从而 $\frac{m_1^2}{s_1^2} \leq \frac{m_2^2}{s_2^2}$, 即得 $\text{ENLR}(\mathbf{r}_1) \leq \text{ENLR}(\mathbf{r}_2)$ 。证毕。

定理1说明了 IENLR 在变化趋势方面与 ENLR 一致。进一步地, 用 sl 表示去噪后结构损失的程度, 设 ENLR 与结构损失之间的映射关系是 $f(sl)$, 即 $\text{ENLR}(\mathbf{r}) = f(sl)$ 。再设 IENLR 与结构损失之间的映射关系是 $g(sl)$, 即 $\text{IENLR}(\mathbf{r}) = g(sl)$ (这里 sl 是个泛化的抽象概念, 比如, 第3节的光滑程度就体现为一种 sl)。那么, 由定理2显然可证明定理2。

定理2 对于含噪图像 $\mathbf{y}$, 如果两次去噪后的结构损失程度分别为 sl_1 和 sl_2 , 则 $f(sl_1) \leq f(sl_2)$ 当且仅当 $g(sl_1) \leq g(sl_2)$ 。

前面已经提过, ENLR 与去噪后结构损失程度之间基本存在单调性, 那么由定理1可知 IENLR 与结构损失程度之间也基本满足单调性。

定理3 1) 当 $s=0, m>0$ 时, $\text{ENLR} = \infty$; 2) 当 $r_i = c$ 时 (其中 c 为大于0的常数, $i=1, \dots, N$), $\text{ENLR} = \infty$ 。

证明 1) 对照式(7)显然可证; 2) 当 $r_i = c$ 时, 注意到 $m = \frac{1}{N} \sum_{1 \leq i \leq N} r_i, s^2 = \frac{1}{N} \sum_{1 \leq i \leq N} (r_i - m)^2$, 显然 $s=0, m>0$, 则可得结论成立。证毕。

显然可得定理4。

定理4 $\text{IENLR} \in [0, 1]$ 。

对比定理3和定理4, 可以发现: 当 s 很小或者 $r_i = c$ 时, ENLR 会出现接近无穷大的现象; 但此时

IEENLR 却能够取到正常的数值。

从以上定理可看出: IENLR 的计算公式是个基本单调、有界的函数。具体而言, 随着去噪程度的增加, 结构损失的程度越来越大, IENLR 的数值也随之单调地减小, 而且 IENLR 的变化范围落在区间 $[0, 1]$ 之中。

定理5 如果 $k_1 \geq k_2 > 0$, $\text{IENLR}_1(\mathbf{r}) = \frac{m^2}{m^2 + k_1 \times s^2}$, 且 $\text{IENLR}_2(\mathbf{r}) = \frac{m^2}{m^2 + k_2 \times s^2}$, 那么 $\text{IENLR}_1(\mathbf{r}) \leq \text{IENLR}_2(\mathbf{r})$ 。

证明 由 $k_1 \geq k_2 > 0$, 可得 $m^2 + k_1 \times s^2 \geq m^2 + k_2 \times s^2$, 则 $\text{IENLR}_1(\mathbf{r}) \leq \text{IENLR}_2(\mathbf{r})$ 。证毕。

定理5说明定义1中参数 k 具有调控大小的作用。即, 参数 k 越大, 则 IENLR 的值越小。因此, IENLR 具有参数的可调节性。

3 仿真实验

从仿真实验的角度来验证 IENLR 方法的效果。这里采用 SRAD 算法^[5], 并且针对仿真的 SAR 图像来进行实验 (即针对无噪声参考图像施加一定的相干斑噪声), 如图1所示, 其中 NNL 为标称视数。以下将 IENLR 与 S/MSE, EC, FOM, SSIM 和 ENLR 进行对比。对于 IENLR, 分别取 $k=20$ 和 $k=30$ 两种情形。其他评价方法的参数均取其默认设置。一般而言, 越大的光滑程度对于去噪效果意味着更多的结构特征损失, 理想评价方法的计算函数应该是单调且有界的函数。

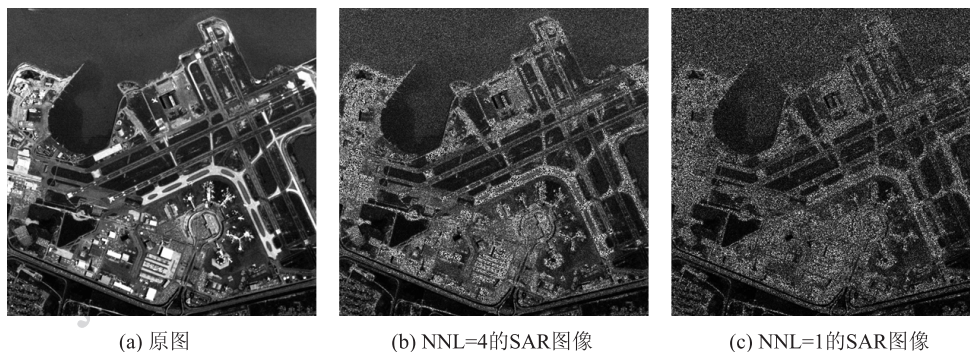


图1 仿真 SAR 图像

Fig. 1 Simulated SAR images

3.1 面向 NNL=4 情形的实验

首先面向 NNL=4 的 SAR 图像进行去噪实验。以下的图2给出了 SRAD 算法光滑程度 h^2 分别取不同值时的去噪结果, 图3给出了对应的比值图像,

其中, σ^2 为噪声方差。

从图2可看出, 随着光滑程度 h^2 的增大, 去噪后图像的边缘逐渐变得模糊, 这意味着结构损失程度与可视化评价效果基本一致。并且, 由图3可以

看出,随着光滑程度 h^2 的增大,比值图像开始含有越来越多的结构特征,从而有更多的结构损失。

进一步地,与图 2、图 3 相对应的 S/MSE、EC、FOM、SSIM、ENLR、IENLR ($k=20$) 和 IENLR ($k=$

30) 等值见表 1。从表 1 容易看出 S/MSE、EC、FOM、SSIM 都无法保持对结构损失程度的单调性。而 ENLR、IENLR ($k=20$) 和 IENLR ($k=30$) 都能保持单调性,即结构损失程度越大时,值越小。

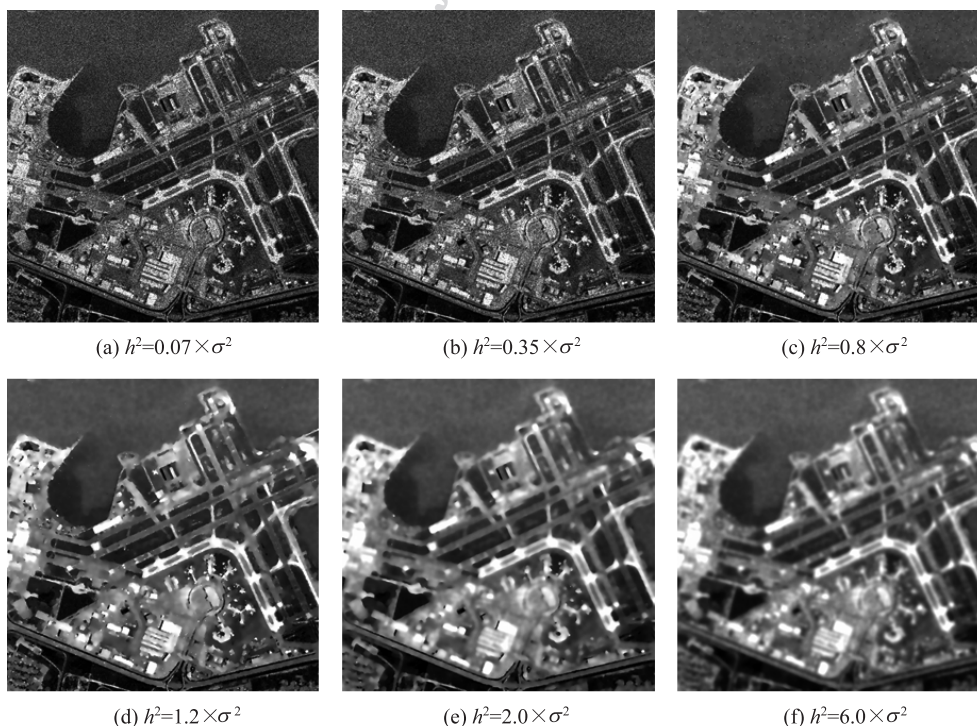


图 2 SRAD 算法得到的去噪图像 (NNL=4)

Fig. 2 Despeckled images derived from SRAD (NNL=4)

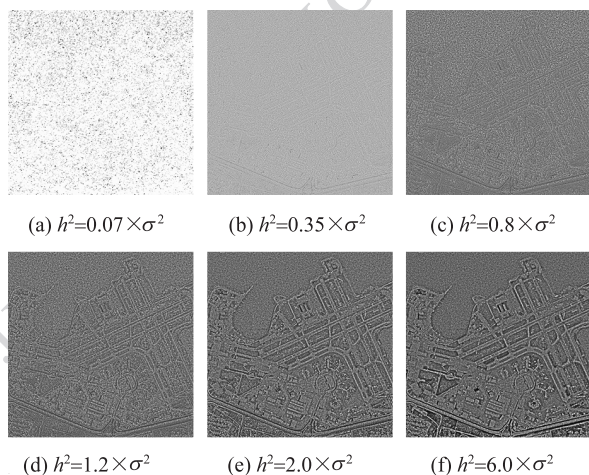


图 3 SRAD 算法得到的相应比值图像 (NNL=4)

Fig. 3 Corresponding ratio images from SRAD (NNL=4)

由于这里重点考虑 ENLR 和 IENLR,因此对这两个方法给出了更进一步的数据,如表 2 所示。从表 1、表 2 可以看出 ENLR 是个基本单调但是却无界的函数(当光滑程度较小时,ENLR 值已达到 16

万,这已然接近无穷大了;而当光滑程度较大时,ENLR 值达到 1.936 9,前后落差太大)。而 IENLR 则是个基本单调、有界的函数,且最大值接近 1(无论 $k=20$ 还是 $k=30$)。值得一提的是,IENLR ($k=20$) 的值比 IENLR ($k=30$) 稍大,但变化趋势相同(都是随着光滑程度的增大而稳步减小),这反映了参数 k 的调节功能。结合图 2、图 3 可以发现,无论是 $k=20$ 还是 $k=30$ 的情形,IENLR 与肉眼观测的效果一致(即结构保持得越好,则 IENLR 越大;或言之,结构损失得越多,则 IENLR 越小)。可见 IENLR 最适合作为衡量结构保持性能的方法。

3.2 面向 NNL=1 情形的实验

对于 NNL=1 的 SAR 图像,图 4 给出了 SRAD 算法的去噪结果,图 5 给出了对应的比值图像。

进一步地,相应的 S/MSE、EC、FOM、SSIM、ENLR、IENLR ($k=20$) 和 IENLR ($k=30$) 等值见表 3,这与图 4 和图 5 相对应。表 4 给出了 ENLR 与 IENLR 的数据。同样可得到类似的结论。

表 1 SRAD 算法得到的结果 (NNL = 4)
Table 1 Results derived from SRAD (NNL = 4)

图 2	h^2	S/MSE	EC	FOM	SSIM	ENLR	IENLR ($k = 20$)	IENLR ($k = 30$)
(a)	$0.07 \times \sigma^2$	12.150 4	0.842 3	0.731 0	0.491 3	90 458.000 0	0.999 94	0.999 91
(b)	$0.35 \times \sigma^2$	13.045 1	0.858 6	0.735 6	0.526 0	139.124 3	0.962 2	0.944 4
(c)	$0.8 \times \sigma^2$	16.585 7	0.913 8	0.567 0	0.644 1	6.575 7	0.546 1	0.445 1
(d)	$1.2 \times \sigma^2$	15.947 4	0.875 9	0.326 9	0.548 4	3.379 0	0.382 1	0.291 9
(e)	$2.0 \times \sigma^2$	13.772 9	0.748 0	0.225 7	0.396 3	2.308 9	0.297 0	0.219 8
(f)	$6.0 \times \sigma^2$	12.851 9	0.672 7	0.283 3	0.334 8	1.936 9	0.261 7	0.191 1

表 2 SRAD 算法得到的 ENLR 与 IENLR (NNL = 4)
Table 2 ENLR and IENLR values derived from SRAD (NNL = 4)

		h^2									
		$0.06 \times \sigma^2$	$0.07 \times \sigma^2$	$0.2 \times \sigma^2$	$0.35 \times \sigma^2$	$0.6 \times \sigma^2$	$0.8 \times \sigma^2$	$1.2 \times \sigma^2$	$2.0 \times \sigma^2$	$3.0 \times \sigma^2$	$6.0 \times \sigma^2$
ENLR		167 824.003 7	90 458.000 0	1 335.231 2	139.124 3	16.482 4	6.575 7	3.379 0	2.308 9	2.038 1	1.936 9
IENLR ($k = 20$)		0.999 97	0.999 94	0.995 9	0.962 2	0.751 0	0.546 1	0.382 1	0.297 0	0.271 6	0.261 7
IENLR ($k = 30$)		0.999 95	0.999 91	0.993 9	0.944 4	0.667 9	0.445 1	0.291 9	0.219 8	0.199 1	0.191 1

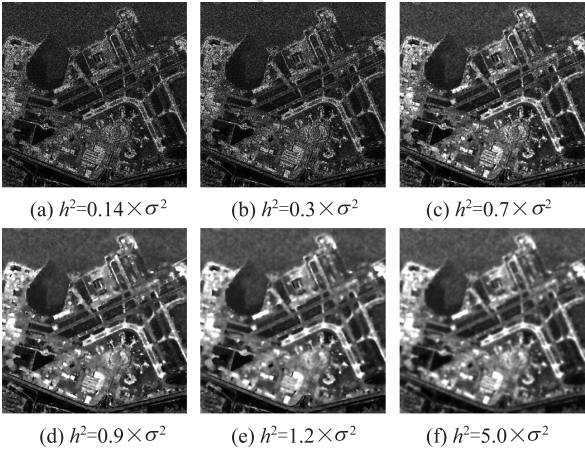


图 4 SRAD 算法得到的去噪图像 (NNL = 1)
Fig. 4 Despeckled images derived from SRAD (NNL = 1)

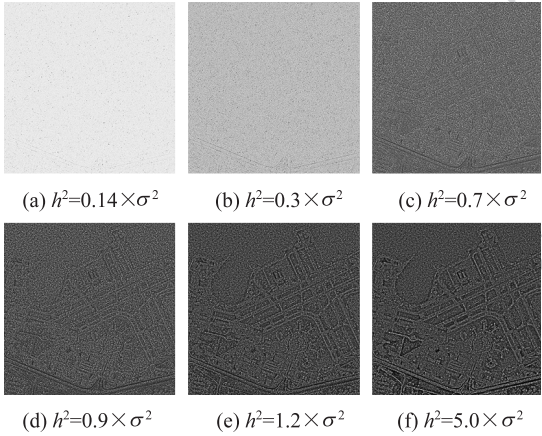


图 5 SRAD 算法得到的相应比值图像 (NNL = 1)
Fig. 5 Corresponding ratio images derived from SRAD (NNL = 1)

表 3 SRAD 算法得到的结果 (NNL = 1)
Table 3 Results derived from SRAD (NNL = 1)

图 4	h^2	S/MSE	EC	FOM	SSIM	ENLR	IENLR ($k = 20$)	IENLR ($k = 30$)
(a)	$0.14 \times \sigma^2$	6.563 6	0.584 4	0.687 2	0.243 1	363.269 6	0.985 2	0.977 9
(b)	$0.3 \times \sigma^2$	7.169 3	0.602 0	0.685 9	0.261 8	25.888 4	0.825 7	0.759 5
(c)	$0.7 \times \sigma^2$	11.384 4	0.734 2	0.561 2	0.419 5	1.645 4	0.231 4	0.167 2
(d)	$0.9 \times \sigma^2$	12.838 7	0.774 3	0.328 2	0.458 8	1.035 2	0.159 3	0.112 1
(e)	$1.2 \times \sigma^2$	12.334 9	0.715 4	0.210 1	0.381 2	0.839 7	0.133 2	0.092 9
(f)	$5.0 \times \sigma^2$	11.719 6	0.648 3	0.323 4	0.326 8	0.760 0	0.122 1	0.084 9

表 4 SRAD 算法得到的 ENLR 与 IENLR (NNL = 1)
Table 4 ENLR and IENLR values derived from SRAD (NNL = 1)

	h^2									
	$0.03 \times \sigma^2$	$0.05 \times \sigma^2$	$0.14 \times \sigma^2$	$0.3 \times \sigma^2$	$0.5 \times \sigma^2$	$0.7 \times \sigma^2$	$0.9 \times \sigma^2$	$1.2 \times \sigma^2$	$2.5 \times \sigma^2$	$5.0 \times \sigma^2$
ENLR	111 544. 856 8	15 725. 366 3	363. 269 6	25. 888 4	4. 591 7	1. 645 4	1. 035 2	0. 839 7	0. 763 8	0. 760 0
IENLR ($k = 20$)	0. 999 95	0. 999 7	0. 985 2	0. 825 7	0. 456 6	0. 231 4	0. 159 3	0. 133 2	0. 122 6	0. 122 1
IENLR ($k = 30$)	0. 999 93	0. 999 5	0. 977 9	0. 759 5	0. 359 0	0. 167 2	0. 112 1	0. 092 9	0. 085 2	0. 084 9

3.3 总体分析

图 6 面向 NNL = 4 (带圆点的线) 和 NNL = 1 (带星点的线) 的情形, 依次给出了 S/MSE、EC、FOM、SSIM、ENLR、IENLR ($k = 20$)、IENLR ($k = 30$) 的变化趋势。此外, 因为 ENLR 在起始阶段的值过大, 因此又增加了 ENLR 的局部变化趋势图, 如图 6 (f) 所示。

从以上的这些图表, 可以得出如下的结论:

1) 对于 S/MSE, 随着光滑程度的递增, 其变换趋势是先增后减 (对照表 1、表 3 和图 6 (a))。以表 1 为例, $0.07 \times \sigma^2$ 对应的 S/MSE 值为 12. 150 4, 到 $0.8 \times \sigma^2$ 对应的值为 16. 585 7, 这属于递增的情形; 而 $1.2 \times \sigma^2$ 对应的值为 15. 947 4, 其值开始下降, 然后逐步递减。前面已经提过, 越大的光滑程度意味着更多的结构特征损失, 因此结构保持性能的度量函数应该是个基本单调的函数, 而 S/MSE 显然不满足这点, 因此并不理想。

2) 类似于 S/MSE 方法, EC、FOM 和 SSIM 都呈现不单调的现象。对于 EC, 可以看出其总体变化趋势是先增后减; 并且对于 NNL = 1 的情形, 最后阶段又有轻微的递增现象 (对照图 6 (b))。对于 FOM, 可以看出其起初时有微小的递增现象, 然后呈现减函数的态势, 最后又开始递增 (比如在表 1 中, $0.07 \times \sigma^2$ 对应的值为 0. 731 0, 到 $0.35 \times \sigma^2$ 对应的值为 0. 735 6, 这是递增的情形; 而随后 $0.8 \times \sigma^2$ 对应的值为 0. 567 0, 到 $2.0 \times \sigma^2$ 对应的值为 0. 225 7, 则都属于递减的状态; 最后 $6.0 \times \sigma^2$ 对应的值为 0. 283 3, 则又是递增的情形)。对于 SSIM, 都是先增后减。因此 EC、FOM 和 SSIM 均不太适合作为衡量结构保持性能的函数。

3) 前面几种方法均为全参考图像的评价方法, 其计算的基本思想都是分析去噪后图像与无噪声参考图像间的匹配程度。而 ENLR 则有所不同, 因为

其属于无参考图像的评价标准。这对于 SAR 图像而言, 意义更加直接 (因为 SAR 图像事实上是难以获取其无噪声参考图像的)。而且, ENLR 的函数基本都是减函数 (在本文的例子中, 完全是减函数), 因此其在一定程度上是较好的度量结构损失的工具。但是, ENLR 在光滑程度较小时, 值非常大 (接近无穷大)。在表 2 中 (NNL = 4 的情形), $0.06 \times \sigma^2$ 对应的值为 167 824. 003 7, 而 $0.8 \times \sigma^2$ 对应的值已经降到 6. 575 7; 在表 4 中 (NNL = 1 的情形), $0.03 \times \sigma^2$ 对应的值为 111 544. 856 8, 而 $0.5 \times \sigma^2$ 对应的值已经降到 4. 591 7。ENLR 的变化显然过于剧烈, 因此也是不理想的。

4) 本文 IENLR 充分继承了 ENLR 的优势 (属于无参考图像的处理模式, 而且函数基本保持关于结构损失程度的单调性)。IENLR 值随着光滑程度的递增而呈现减函数的态势 (在本文的例子中, 完全是减函数), 而且其 IENLR 值与肉眼观测效果一致; IENLR 值越小, 则结构损失越厉害, 从而结构保持越差。不仅如此, 在光滑程度较小时, IENLR 值依然非常合理 (没有出现无限增大的趋势)。在函数值方面, IENLR 值始终处于 $[0, 1]$ 的区间之内; 特别地, 当光滑程度较小时, 结构保持显然是最好的, 而此时的 IENLR 值与 1 非常接近, 这是非常合理的。比如, 在表 2 中 (NNL = 4 的情形), $0.06 \times \sigma^2$ 对应的 IENLR ($k = 20$) 值为 0. 999 97, 且对应的 IENLR ($k = 30$) 值为 0. 999 95, 与 1 非常接近; 在表 4 中 (NNL = 1 的情形), $0.03 \times \sigma^2$ 对应的 IENLR ($k = 20$) 值为 0. 999 95, 且对应的 IENLR ($k = 30$) 值为 0. 999 93。此外, IENLR 中参数 k 的不同取值会适当调节 IENLR 的大小, 却不影响 IENLR 的变化趋势和有界性, 因此可以根据实际需要选取理想的 k 值。总之, IENLR 是关于结构保持性能的基本单调、有界的函数, 且具有参数可调性。

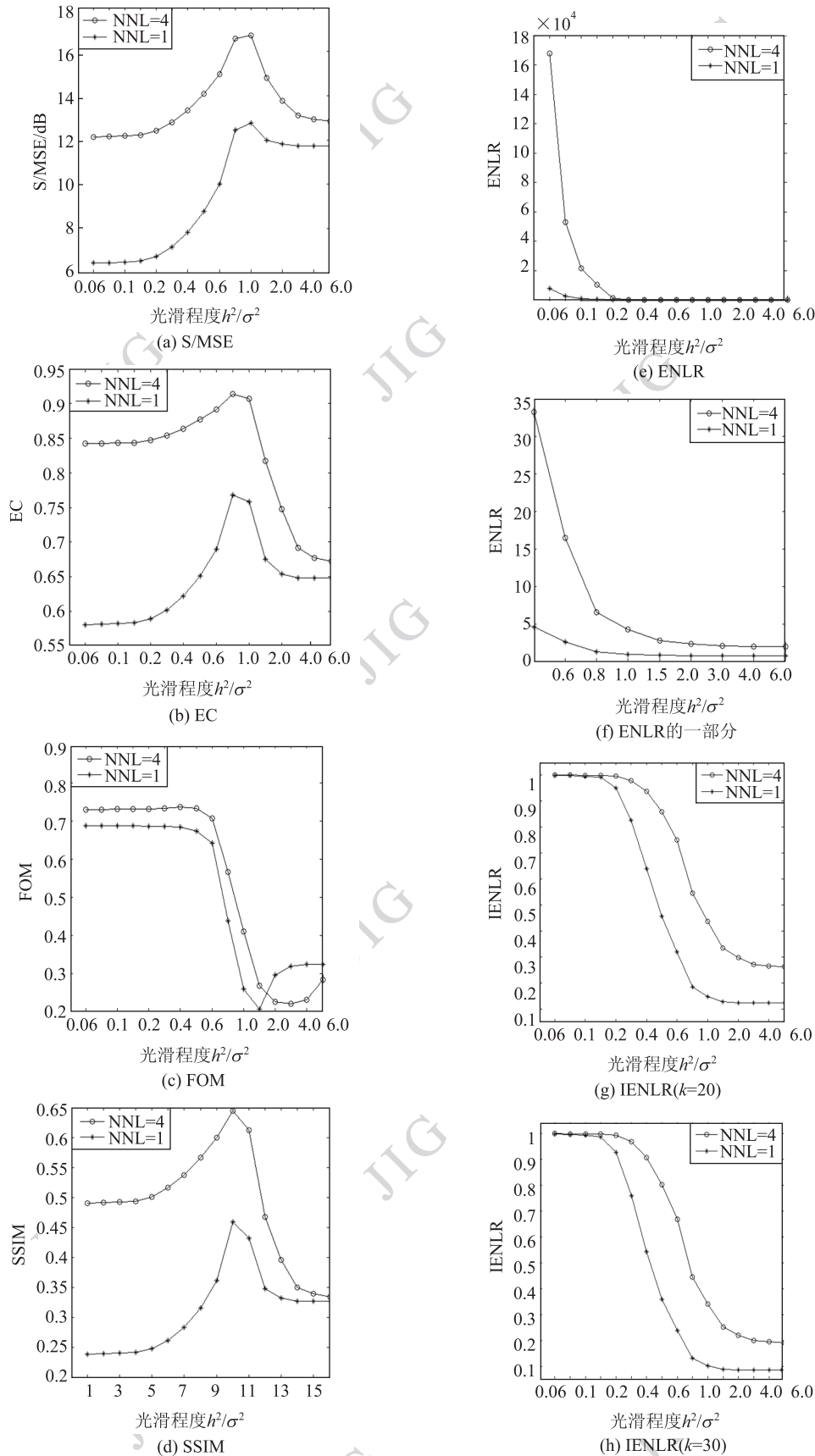


图6 各个方法的趋势变化

Fig. 6 Trend variation of all methods

由此可见,对于 SAR 图像去噪的结构保持性能的度量问题, IENLR 是个较为理想的图像质量评价方法,且优于其他的相关图像质量评价方法。

关于 IENLR 中参数 k 的选取,其基本原则是:尽量让 IENLR 的函数值充满整个 $[0, 1]$ 区间,即让其最大值和最小值的差距尽可能最大(这是为了便于更好地区分去噪结果的结构保持性能)。比如,若 k 的设置使得 IENLR 位于区间 $[0.8, 0.9]$ 中,则显然不易分辨结构保持性能的好坏。又比如,在前文表 1 中, $k=20$ 时 IENLR 基本处于区间 $[0.2617, 0.99994]$ 中,而 $k=30$ 时 IENLR 基本处于 $[0.1911, 0.99991]$ 中。这两者的可分辨性总体都不错,而相比之下 $k=30$ 时的可分辨性更为理想。在具体实施时,可以分别测试(基本)最差情形、最好情形对应的 IENLR 值,分别设为 I_1, I_2 ; 然后计算 $|I_2 - I_1|$ 。若 $|I_2 - I_1|$ 偏小,则调整参数 k 使 $|I_2 - I_1|$ 尽可能达到最大(理想状态是 $|I_2 - I_1|$ 接近 1)。

对于 IENLR 如何实用化的问题,将是未来工作的一个核心要点。这里不作展开,仅给出一点初步的考虑。一般地,假设有 2 个 SAR 图像的去噪算法 A 和去噪算法 B。首先通过其他方式分别确定两个去噪算法的最佳状态(比如通过肉眼,或者凭借 S/MSE、SSIM 等已有质量评价方法确定其最佳状态)。然后面向最佳状态进行这两个去噪算法的性能对比;具体而言,分别测试算法 A 和算法 B 在其最佳状态时的 IENLR 值,如果此时算法 A 的 IENLR 值较大,那么从结构保持性能的角度,算法 A 比算法 B 优。这就对 SAR 图像去噪算法的设计给出了一种新的指导模式。特别地,今后在利用多个质量评价方法来评价某去噪算法的效果时,可以再加上 IENLR 方法,这样能得到更为全面的判断。

4 结 论

结构保持性能的度量是 SAR 图像去噪的重要课题,理想的图像质量评价方法应该是单调、有界的函数。但是现有相关评价方法均不能保证这点。为此,本文在 ENLR 的基础上,提出了更为恰当的新方法 IENLR。从理论证明和仿真实验的双重角度的分析,都证明 IENLR 方法具有优良的性质,且优于现有的相关图像质量评价方法(包括 S/MSE、EC、FOM、SSIM 和 ENLR)。具体而言, IENLR 的优势主要体现在如下几个方面:

1) IENLR 随着结构损失程度的增加而呈现减函数的态势,或言之,结构保持得越好,则 IENLR 越大。而且 IENLR 计算函数的整个变化过程是平稳的,没有出现突然急剧变化的现象,这有效避免了 ENLR 的弱点。

2) IENLR 是个有界的函数,其取值落在 $[0, 1]$ 区间中。并且,当结构保持越好的时候, IENLR 越接近 1。

3) IENLR 的参数 k 可用来调控 IENLR 的变化快慢和取值大小,从而 IENLR 具有参数可调性。

4) IENLR 的值与肉眼观测效果是基本一致的。即从视觉效果来看,结构保持得越好,则 IENLR 的值越大。这也是 IENLR 优势的重要体现。

进一步地,从实验结果来看, IENLR 是关于结构保持性能的基本单调的函数,但如果从更严格的意义来分析,这能否从理论上证明其单调性,反言之,是否有可能会出现不单调的情形? 这点目前尚难以肯定回答。此外,如何根据 IENLR 来指导 SAR 图像去噪算法的设计,比如,如何从 IENLR 出发设计出更为合理的 SRAD 算法,这些都将是未来的工作重点。

参考文献 (References)

- [1] Yang X Z, Clausi D A. Evaluating SAR sea ice image classification using edge-preserving region-based MRFs [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(5): 1383-1393.
- [2] Lu J, Yang X Z, Lang W H, et al. SAR image segmentation with region-based GMM [J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(11): 2088-2094. [卢洁, 杨学志, 郎文辉, 等. 区域 GMM 聚类的 SAR 图像分割 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(11): 2088-2094.]
- [3] Argenti F, Bianchi T, Alparone L. Multiresolution MAP despeckling of SAR images based on locally adaptive generalized Gaussian pdf modeling [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3385-3399.
- [4] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(6): 992-1000.
- [5] Yu Y, Acton S T. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(11): 1260-1270.
- [6] Aja-Fernandez S, Alberola-Lopez C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9):

- 2694-2701.
- [7] Gleich D, Datcu M. Gauss-Markov model for wavelet-based SAR image despeckling [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2006, 13(6): 365-368.
 - [8] Dai M, Peng C, Chan A K, et al. Bayesian wavelet shrinkage with edge detection for SAR image despeckling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1642-1648.
 - [9] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego: IEEE Computer Society Press, 2005: 60-65.
 - [10] Yang X Z, Clausi D A. Structure-preserving speckle reduction of SAR images using nonlocal means filters [C]// Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Image Processing. Cairo, Egypt: IEEE Computer Society, 2009: 2985-2988.
 - [11] 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.
 - [12] Gleich D, Kseneman M, Datcu M. Despeckling of TerraSAR-X data using second-generation wavelets [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(1): 68-72.
 - [13] Li H, Hong W, Wu Y, et al. Texture-preserving despeckling of SAR images using evidence framework [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4(4): 537-541.
 - [14] Subrahmanyam G R K S, Rajagopalan A N, Aravind R. A recursive filter for despeckling SAR images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2008, 17(10): 1969-1974.
 - [15] Dowson N, Salvado O. Hashed nonlocal means for rapid image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(3): 485-499.
 - [16] Katkovnik V, Foi A, Egiazarian K, et al. From local kernel to nonlocal multiple-model image denoising [J]. International Journal of Computer Vision, 2010, 86(1): 1-32.
 - [17] Sattar F, Florey L, Salomonsson G, et al. Image enhancement based on a nonlinear multiscale method [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(6): 888-895.
 - [18] Amirmazlaghani M, Amindavar H. A novel sparse method for despeckling SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(12): 1-9.
 - [19] Gomez L, Munteanu C, Jacobo-Berles J, et al. Evolutionary expert-supervised despeckled SRAD filter design for enhancing SAR images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 814-818.
 - [20] Ranjani J J, Thiruvengadam S J. Dual-tree complex wavelet transform based SAR despeckling using interscale dependence [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2723-2731.
 - [21] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
 - [22] Brunet D, Vrscay E R, Wang Z. On the mathematical properties of the structural similarity index [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(4): 1488-1499.
 - [23] Touzi R. A review of speckle filtering in the context of estimation theory [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2392-2404.
 - [24] Molina D E, Gleich D, Datcu M. Gibbs random field models for model-based despeckling of SAR images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(1): 73-77.
 - [25] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images [M]. Raleigh, NC: SciTech Publishing, 2004.
 - [26] Celik T. A Bayesian approach to unsupervised multiscale change detection in synthetic aperture radar images [J]. Signal Processing, 2010, 90(5): 1471-1485.
 - [27] Walessa M, Datcu M. Model-based despeckling and information extraction from SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2258-2269.