

基于非下采样轮廓波变换和加权引导滤波的 遥感图像增强

王圣, 周兴林*, 朱攀, 董建平

武汉科技大学机械自动化学院冶金装备及其控制教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081

摘要 针对部分遥感图像整体亮度偏暗、边缘细节特征模糊和可视性不够理想的缺点, 提出了一种基于非下采样轮廓波变换(NSCT)与加权引导滤波的增强方法来改善图像质量。先利用 NSCT 获取图像多尺度子带图像, 再对低频子带图像采取全局映射调整亮度, 利用加权引导滤波器代替 Retinex 中的高斯滤波器获取细节分量和基础分量, 同时采用比例因子调整两分量在低频子带图像中的比例; 采用改进的自适应贝叶斯阈值和非线性增益函数增强各个高频子带图像; 最后将各子带信息通过 NSCT 逆重构得到增强图像。与传统图像增强算法相比, 该方法在清晰度和信息熵等方面有所提高, 较好地保留细节特征, 明显提高视觉效果。

关键词 图像处理; 图像增强; 非下采样轮廓波变换; 引导滤波器; 比例因子; 自适应贝叶斯阈值

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.121018

Remote Sensing Image Enhancement Based on Non-Subsampled Contourlet Transform and Weighted Guided Filtering

Wang Sheng, Zhou Xinglin*, Zhu Pan, Dong Jianping

Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control, Ministry of Education, School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430081, China

Abstract This study proposes an enhancement method based on non-subsampled contourlet transform (NSCT) and multi-scale guided filtering to solve the shortcomings of lack of brightness, blurry edge details, and unsatisfactory visual effects for partial remote sensing images. First, the multi-scale sub-band image was obtained using NSCT. Then, global dynamic mapping was applied to a low-frequency sub-band image to adjust the brightness. Accordingly, a weighted guided filter was used to replace the Gaussian filter in Retinex to obtain the detail and base components. Scale factor was utilized to adjust the ratio of the two components in the low-frequency sub-band image. The adaptive Bayesian threshold based on the features of each direction and the enhanced nonlinear gain function were employed to improve the high frequency sub-band coefficients. Finally, the processed sub-band was inversely reconstructed by NSCT to obtain an enhanced image. Compared with traditional enhancement algorithms, the proposed method herein improves definition and information entropy, preserves detail features, and enhances the visual effect.

Key words image processing; image enhancement; non-subsampled contourlet transform; guided filter; scale factor; adaptive Bayesian threshold

OCIS codes 100.2980; 100.3008; 100.2960

1 引言

获取遥感图像的过程中, 环境噪声和成像系统等因素会造成图像出现视觉效果差、对比度低和边

缘模糊等现象, 不利于后续图像处理^[1]。图像增强算法依据运行的空间不同, 一般分为空间域法和频域法两类。空间域法实时性好, 但易过度增强导致图像丢失细节信息, 放大噪声, 其代表算法有灰度空

收稿日期: 2019-08-08; 修回日期: 2019-09-02; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(51578423)

* E-mail: zx165@163.com

间域变换^[2]、直方图均衡(HE)算法^[3]和反锐化掩模^[4]等。小波变换^[5]、曲波变换^[6]和轮廓波变换^[7]均为频域增强方法,小波变换和曲波变换能有效抑制图像噪声,但只能捕获图像的有限方向信息,无法对连续边缘进行有效分辨,易造成图像边缘形状扭曲和细节损失等现象,而轮廓波变换克服了这个局限,但因轮廓波不具有平移不变性的优点,易出现伪吉布斯(Gibbs)现象。da Cunha等^[8]提出的非下采样轮廓波变换(NSCT)方法具有多尺度、多方向和平移不变性等优点,能有效抑制噪声并突出图像轮廓特征,近年来广泛应用于图像处理领域^[9-11],但该增强方法在光照不均的情况下,无法得到较好的视觉效果。Retinex增强算法^[12]可改善光照不均所带来的影响,提高图像的清晰度,但传统基于高斯滤波的Retinex算法易出现“光晕现象”,丢失图像的边缘细节信息。He等^[13-14]提出的引导滤波算法具有良好的边缘保持特性,能有效避免光晕现象。

基于上述剖析,本文结合NSCT和多尺度引导

滤波改进Retinex算法对低质遥感图像进行多尺度增强;采用多尺度引导滤波和对比度调节因子对低频子带进行调整,以提高图像整体的对比度、清晰度和保持更多边缘纹理细节;结合贝叶斯阈值和非线性增强模型处理高频子带系数,以抑制噪声和突出边缘细节。

2 相关理论

2.1 NSCT

NSCT与轮廓波变换类似,由子带分解和方向变换两个步骤组成。先采用非下采样金字塔(NSP)滤波器组对原图像进行多尺度分解,获得一个低频子带和多个带通子带,再通过非下采样方向滤波器组(NSDFB)对带通子带进行方向变换。NSCT利用NSP滤波器组和NSDFB去除上下采样步骤,避免轮廓波变换出现频率混叠现象,实现了平移不变性,能更好地对图像进行稀疏逼近。NSCT的分解流程如图1(a)所示,理想频率分解如图1(b)所示。

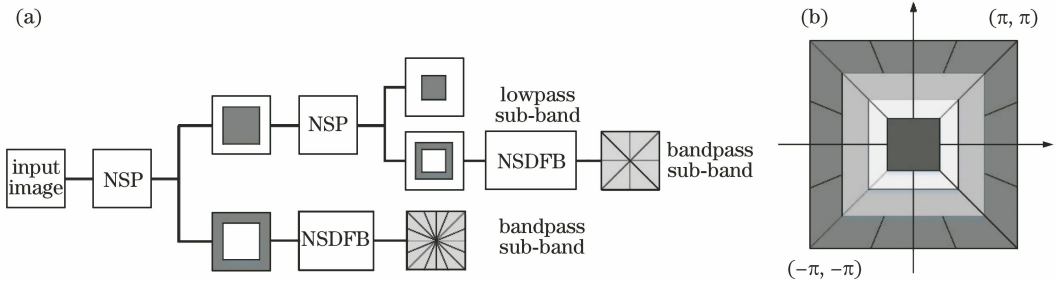


图1 NSCT。(a)分解流程;(b)理想频率分解

Fig. 1 NSCT. (a) Decomposition process; (b) ideal frequency decomposition

2.2 Retinex 理论

Land等^[15]提出的Retinex算法模型认为原图像是照射分量和反射分量的乘积,即

$$S(x, y) = R(x, y) \times L(x, y), \quad (1)$$

式中: (x, y) 为图像的像素点; $S(x, y)$ 为原图像; $R(x, y)$ 为反射分量; $L(x, y)$ 为照射分量。通过降低或去除 $L(x, y)$ 来增强图像的视觉效果,对数域的单尺度Retinex(SSR)为常用增强方法,表达式为 $\lg R(x, y) = \lg S(x, y) - \lg[G(x, y) * S(x, y)]$,

$$(2)$$

式中: $*$ 为卷积操作; $G(x, y)$ 为中心环绕函数,常采用高斯环绕函数,即

$$G(x, y) = u \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma^2], \quad (3)$$

式中: u 为归一化因子; σ 为尺度因子。多尺度Retinex(MSR)是通过多个 σ 组合的高斯平滑函数对 $L(x, y)$ 进行估计,弥补SSR对颜色保真与细节

保持的不足,即

$$\lg R(x, y) = \sum_{m=1}^N W_m \{ \lg S(x, y) - \lg[G_m(x, y) * S(x, y)] \}, \quad (4)$$

式中: N 为尺度的总数; W_m 为对应第 m 个SSR所占的权重,通常 $W_m = 1/3$ 。

2.3 引导滤波

He等^[13-14]提出的引导滤波是边缘保持滤波,采用最小二乘法的思想,以局部线性模型对图像进行平滑滤波和边缘细节保持,表达式为

$$q_i = a_h I_i + b_h, \quad \forall i \in \omega_h, \quad (5)$$

式中: I_i 为引导图像在像素 i 处的值; q_i 为像素 i 的滤波输出值; ω_h 为以像素 h 为中心的滤波窗口,其半径为 r ; a_h 和 b_h 为 ω_h 的内线性系数,可由最小代价函数约束,即

$$E(a_h, b_h) = \sum_{i \in \omega_h} [(a_h I_i + b_h - p_i)^2 + \epsilon a_h^2], \quad (6)$$

式中: p_i 为输入图像在 i 处的值; ϵ 为正则化参数, 防止局部线性模型的梯度过高; a_h 和 b_h 的最优解可根据线性回归分析表示为

$$a_h = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_h} I_i p_i - \mu_h \bar{p}_h, \quad (7)$$

$$b_h = \bar{p}_h - a_h \mu_h, \quad (8)$$

式中: μ_h 和 \bar{p}_h 分别为引导图像 I 和输入图像 p 在 ω_h 中的均值; σ_h^2 为 I 在 ω_h 中的方差; ω 为 ω_h 中像素的个数。 r 决定图像显著差异程度, ϵ 决定图像平滑程度, 不同 r 和 ϵ 取值下处理的图像平滑滤波效果, 如图 2 所示。

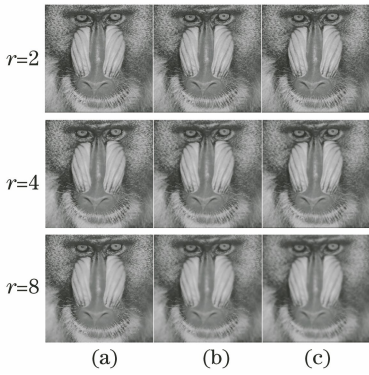


图 2 不同 r 和 ϵ 取值下处理的图像平滑滤波效果。

(a) $\epsilon=0.01$; (b) $\epsilon=0.04$; (c) $\epsilon=0.16$

Fig. 2 Diagram of images smoothing filter effect with different r and ϵ . (a) $\epsilon=0.01$; (b) $\epsilon=0.04$; (c) $\epsilon=0.16$

3 本文方法

3.1 低频子带处理

图像经 NSCT 分解后的低频子带包含原图像大量背景信息, 而大部分噪声在高频子带中, 因此, 可通过改进的 Retinex 算法提高低频子带整体的对比度。

通过压缩低频子带图像的全局动态范围^[16]得到更好的人眼视觉效果, 即

$$H(x, y) = \frac{\lg[W(x, y)/\bar{W} + 1]}{\lg(W_{\max}/\bar{W} + 1)}, \quad (9)$$

式中: $H(x, y)$ 为全局自适应输出; $W(x, y)$ 为输入图像; W_{\max} 和 \bar{W} 分别为输入图像最大值和对数平均值, \bar{W} 可表示为

$$\bar{W} = \exp\left\{\sum_{x, y} \lg[\delta + W(x, y)]/M\right\}, \quad (10)$$

式中: M 为像素总数; δ 为较小的常数, 避免对纯黑像素进行对数运算时数值溢出。

传统多尺度 Retinex 算法中的高斯滤波在分配滤波权重时只考虑像素间的距离, 忽略像素的灰度值信息, 从而导致图像边缘的滤波结果不准确, 易出现梯度翻转现象。引导滤波具有较好的保边平滑性能, 有效地避免了伪边缘缺陷, 故使用多尺度引导滤波代替高斯环绕函数对低频子带图像进行增强处理, 突出隐藏的边缘细节信息。

引导滤波对所有的像素点均采用相同 ϵ 值, 因此对于纹理变化剧烈和边缘信息丰富的区域会出现一定程度的模糊现象, 导致边缘细节信息不能被很好的体现。因此考虑不同区域的差异信息对 ϵ 进行自适应调整, 提高算法的保边平滑性能, 采用边缘权重因子 $G(i)$ ^[17] 对 ϵ 进行调节, 表达式为

$$G(i) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{\sigma^2(i') + \alpha}{\sigma^2(i) + \alpha}, \quad (11)$$

$$\epsilon' = \epsilon/G(i), \quad (12)$$

式中: i' 为取遍引导图像 I 中所有像素, ϵ' 为修正后的正则化参数; $\sigma^2(\cdot)$ 为像素点在 3×3 领域内的方差; α 为固定的正则化因子, 通常 $\alpha = (0.001 \times L)^2$, L 为图像的动态范围。

MSR 方法融合多尺度的优点对 $L(x, y)$ 进行估计, 采用引导滤波处理低频子带时, 尺度参数可由图像大小设置为 3 个尺度, r 的取值范围为小尺度 $[1, r_{\min}]$ 、中尺度 $[r_{\min}, r_{\text{mid}}]$ 和大尺度 $[r_{\text{mid}}, r_{\max}]$, 分别定义为

$$r_{\min} = \lceil \min(H, W)/8 \rceil, \quad (13)$$

$$r_{\max} = \lceil \min(H, W)/2 - 1 \rceil, \quad (14)$$

$$r_{\text{mid}} = \lceil (r_{\min} + r_{\max})/2 \rceil, \quad (15)$$

式中: H 和 W 为待滤波图像长和宽; $\lceil \cdot \rceil$ 为下取整。

通过(11)式和(12)式构造 3 个尺度的加权引导滤波函数对原图像进行滤波处理, 得到基础层 $D(x, y)$, 通过与原图 $S(x, y)$ 作差得到细节层 $P(x, y)$, 即

$$P(x, y) = S(x, y) - D(x, y). \quad (16)$$

图像的大部分能量仍存在于基础层, 通过比例因子 λ 调整 $D(x, y)$ 和 $P(x, y)$ 在原图像中的比例, 叠加增益因子 $\Delta\phi$ 提高图像的清晰度, 通过指数还原图像, 即

$$I_{\text{out}} = \exp[\lambda D(x, y) + P(x, y) + \Delta\phi], \quad (17)$$

式中: I_{out} 为增强后的图像。 $P(x, y)$ 并未发生变化, 细节信息得以保留。

通过图像的具体特征设置对比度增强因子 μ 来构造 λ , 表达式为

$$\lambda = \frac{\lg \mu}{\max[p(x, y)] - \min[p(x, y)]}, \quad (18)$$

式中: $\max[p(x, y)]$ 和 $\min[p(x, y)]$ 分别为基础层的最大和最小强度值。通过 $\Delta\phi$ 调整图像的对比度视觉效果是为了避免输出大于最大强度值, $\Delta\phi$ 可表示为

$$\Delta\phi = (1 - \lambda) \max[p(x, y)]. \quad (19)$$

3.2 高频子带处理

经 NSCT 后, 边缘信息和噪声主要位于高频子带图像中, 可通过贝叶斯萎缩法估计阈值^[18]和非线性变换调整高频子带系数, 增强边缘细节信息和抑制噪声。贝叶斯萎缩法估计阈值的表达式为

$$T = \sigma_n^2(k, s) / \sigma(k, s), \quad (20)$$

式中: $\sigma_n(k, s)$ 和 $\sigma(k, s)$ 分别为第 k 尺度、第 s 方向高频子带的噪声标准差和信号标准差。 $\sigma_n(k, s)$ 的估计值可采用中值法得到, 即

$$\sigma_n(k, s) = \text{median}[|g_k^s(i, j)|] / 0.6745, \quad (21)$$

式中: $g_k^s(i, j)$ 为第 k 尺度、第 s 方向高频子带在 (i, j) 位置上的系数。根据最大似然估计法得到

$$\sigma(k, s) = \{\max[\sigma_g^2(k, s)] - \sigma_n^2(k, s), 0\}^{\frac{1}{2}}, \quad (22)$$

式中: $\sigma_g^2(k, s)$ 为高频子带系数方差。(20)式中 T 只考虑子带系数尺度间的相关性, 忽略尺度内各方向子带间的相关性, 由于 NSCT 的高频子带图像边缘细节信息在各个尺度方向间表现不同, 且其系数绝对值较小, 根据平均值和最小值特征改进阈值, 即

$$T_k^s = \frac{\bar{g}_k^s - g_{k, \min}^s}{\bar{g}_k^s - g_{k, \min}^s} T, \quad (23)$$

式中: T_k^s 为 k 尺度、第 s 方向高频子带系数的阈值; \bar{g}_k^s 为 NSCT 域内第 k 尺度所有高频子带系数的平均值; \bar{g}_k^s 和 $g_{k, \min}^s$ 分别为 k 尺度、第 s 方向高频子带系数的平均值和最小值。

对小于 T_k^s 的系数进行抑制, 而对大于 T_k^s 的系数视为弱边缘, 通过非线性增益函数^[19]进行调整, 即

$$g(x) = \frac{f[c(x - b)] - f[-c(x + b)]}{f[c(1 - b)] - f[-c(1 + b)]}, \quad (24)$$

式中: $f(x) = 1/[1 + \exp(-x)]$; c 为增益强度, 一般在 $[10, 50]$ 间取值, 实验取 $c = 20$; b 为控制增益函数曲线形状, 取值范围为 $[0, 1]$, 由

$$T_k^s = \frac{f[c(T_k^s - b)] - f[-c(T_k^s + b)]}{f[c(1 - b)] - f[-c(1 + b)]} \quad (25)$$

自适应求解 b 值。图 3 为 $b = 0.2, c = 40$ 时 $g(x)$ 的曲线, 可以看到 $g(x)$ 在定义域内满足单调递增和反对称性, 通过 $g(x)$ 将较大的图像细节信息的系数绝对值放大, 较小的噪声分量的系数绝对值缩小, 因此该函数能较好地增强边缘细节信息和抑制噪声分量。

依据上述分析, 将高频子带系数进行归一化, 表达式为

$$\bar{g}_k^s(i, j) = \max g_k^s g \left[\frac{g_k^s(i, j)}{\max g_k^s} \right], \quad (26)$$

式中: $\max g_k^s$ 为对应高频子带系数的最大值, 调整后的子带系数为 $\bar{g}_k^s(i, j)$ 。

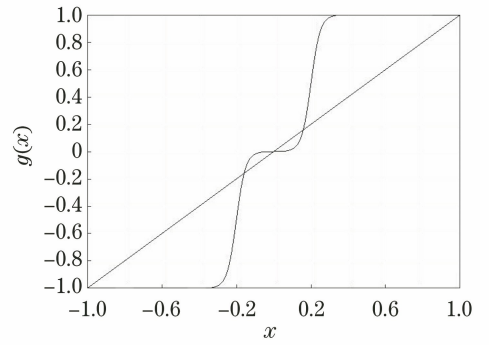


图 3 非线性增益函数曲线

Fig. 3 Curves of nonlinear enhancement function

3.3 所提方法的具体步骤

1) 对原图像进行 NSCT 分解, 得到各尺度下的多方向高频子带系数和低频子带系数。

2) 处理低频子带分量的步骤: 依据 (9) 式和 (10) 式对低频子带图像进行全局动态调整, 调整后的系数通过 (11) 式和 (12) 式构建的加权引导滤波进行增强处理, 按照 (16) 式将图像分为细节区域和基础区域, 再依据 (18) 式和 (19) 式构建对比度增强因子, 提高图像的整体清晰度和亮度, 最终通过 (17) 式将细节区域和基础区域进行组合。

3) 依据 (20) 式和 (23) 式得到各个高频子带分量的贝叶斯萎缩阈值 T_k^s , 再结合 (24) 式和 (25) 式增强弱边缘。

4) 对调整后的低频子带和各个高频子带进行 NSCT 重构, 得到增强后的图像。

4 实验结果与分析

为了验证所提方法的有效性, 在 MATLAB 平台上 (Intel Core i3-2100 CPU 3.10 GHz) 对大量低质遥感图像进行实验, 将所提方法的增强效果与 HE 方法^[20]、MSR 方法、离散小波 (DWT) 方法^[21]

和文献[22]的方法分别从主观视觉效果和客观评价指标两个方面来分析方法的优劣。选取3幅具有代表性的遥感图像增强结果,如图4所示。

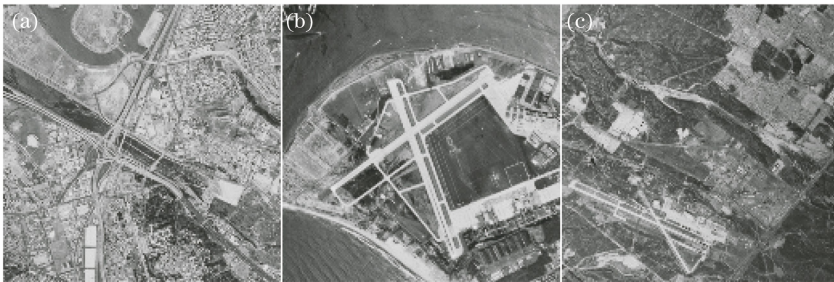


图4 遥感图像。(a)城市;(b)岛屿;(c)道路

Fig. 4 Remote sensing images. (a) City; (b) island; (c) road

实验结果如图5所示,HE方法具有自适应调节图像的对比度,但出现局部块效应和亮度失真,导致处理后的图像质量下降;MSR方法处理后的图像过度增强,局部易出现光晕伪影现象,细节信息丢失严

重;DWT方法处理后的图像整体偏暗,视觉效果不佳;文献[22]虽能较好地增强图像,但整体增强效果不够明显;所提方法能很好地增强图像边缘细节,抑制噪声并能提升图像的对比度,视觉效果较好。

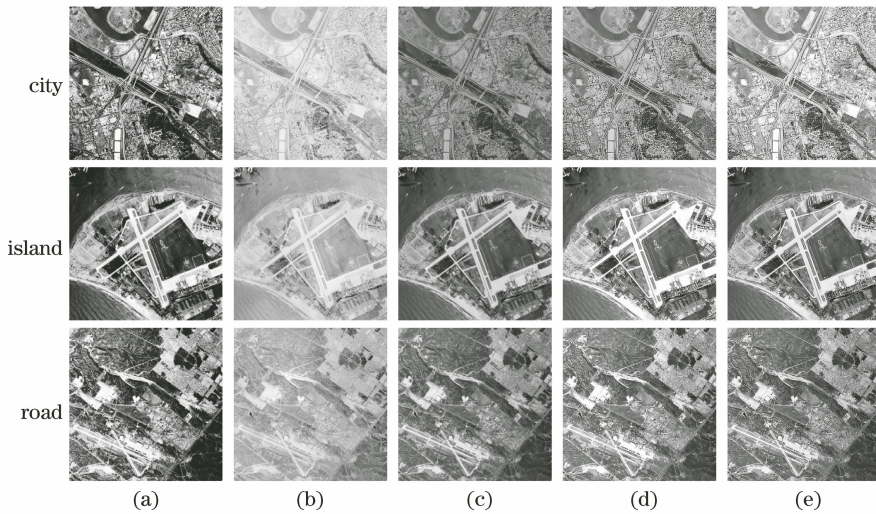


图5 不同方法的增强效果对比。(a) HE;(b) MSR;(c) DWT^[21];(d)文献[22];(e)所提方法

Fig. 5 Comparison of enhancement effects of different methods. (a) HE; (b) MSR; (c) DWT^[21]; (d) Ref. [22]; (e) proposed method

从视觉方面定性评价图像的增强效果具有一定的主观性,因此实验采用边缘强度(EINT)、平均梯度(AG)和信息熵(Entropy)3种客观评价指标对图像的增强效果进行定量分析,如表1所示。边缘强度是边缘点梯度的幅值,值越大表明图像边缘越清晰;信息熵用于度量图像信息的丰富程度,值越大表明信息量越大;平均梯度能较好地反映图像的对比度和纹理变化特征,值越大表明图像越清晰。

为了进一步验证所提方法对遥感图像的增强效果,选取25幅大小不同的低质遥感图像进行实验以统

计各个客观指标的平均值,统计结果如表2所示。从表2可以看到,虽HE方法的平均梯度值和边缘强度值高于其他方法,但细节过度增强导致其处理后的图像出现局部失真,掩盖细节纹理信息,且信息熵值最低。与其他4种方法相比,所提方法在边缘强度、信息熵和平均梯度指标上表现优异。所提方法因NSCT得到的每一尺度上方向子带数量较多,且处理的数据也较多,导致运行时间较长,但相较于文献[22]的算法有一定提升,能保持更多细节信息,增强图像边缘信息和对比度,改善图像整体的视觉效果。

表 1 5 种增强方法的客观指标评价

Table 1 Evaluation of objective indicators of five enhancement methods

Image	Index	Method				
		HE	MSR	DWT	Ref. [22]	Proposed
City	EINT	246.39	87.87	125.06	237.30	249.96
	Entropy	5.98	6.67	7.17	7.27	7.74
	AG	26.76	9.53	13.80	24.56	27.80
	Time/s	3.51	3.73	7.32	52.34	49.72
Island	EINT	133.03	55.85	87.33	127.21	138.83
	Entropy	5.96	6.92	7.44	7.25	7.62
	AG	13.75	5.74	8.89	12.87	13.91
	Time/s	3.41	3.65	6.68	53.45	49.29
Road	EINT	184.87	74.81	107.35	150.61	163.16
	Entropy	5.96	6.99	7.48	7.25	7.63
	AG	20.52	8.28	11.71	15.03	18.67
	Time/s	3.46	3.67	6.96	52.68	49.45

表 2 5 种方法的指标定量比较

Table 2 Quantitative comparison of indicators of five methods

Method	EINT	Entropy	AG
HE	180.69	5.72	19.73
MSR	62.96	6.72	6.77
DWT	91.60	6.90	9.86
Ref. [22]	142.67	7.08	14.75
Proposed	154.84	7.45	16.97

5 结 论

提出了一种基于 NSCT 和改进引导滤波的遥感图像增强方法,充分利用了 NSCT 的多尺度、多方向特性和引导滤波较好的保边平滑性能。对低频子带图像采用加权引导滤波进行调整,提升低频图像的对比度和清晰度并较好地保持更多边缘纹理细节,避免产生光晕现象;对高频子带图像根据子带系数方向间的相关性自适应计算阈值,依据改进的贝叶斯阈值和非线性增益函数调整高频系数,以增强边缘细节并抑制噪声。实验结果表明,所提方法能有效地避免产生光晕现象和抑制图像噪声,同时保留了更多的边缘细节信息。下一步工作将延伸如何根据图像特征自适应调节参数值。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Zhang Y, Shen H H, et al. Review of image enhancement algorithms[J]. Chinese Journal of Optics, 2017, 10(4): 438-448.
王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438-448.
- [2] Kotkar V A, Gharde S S. Review of various image

contrast enhancement techniques [J]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2013, 2(7): 2786-2793

- [3] Zhu R, Zhu L, Li D N. Study of color heritage image enhancement algorithms based on histogram equalization[J]. Optik, 2015, 126(24): 5665-5667.
- [4] Lin S C F, Wong C Y, Jiang G, et al. Intensity and edge based adaptive unsharp masking filter for color image enhancement[J]. Optik, 2016, 127(1): 407-414.
- [5] Cho D, Bui T D. Fast image enhancement in compressed wavelet domain[J]. Signal Processing, 2014, 98: 295-307.
- [6] Li J C, Xie K, Ruan N J, et al. Medical image enhancement based on curvelet transform [J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(1): 187-191.
李纪成, 谢凯, 阮宁君, 等. 基于曲波变换的医学图像增强算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 187-191.
- [7] Wu Y Q, Yin J. Reconstructed image enhancement of digital holography in Contourlet domain based on particle swarm optimization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(8): 0809002.
吴一全, 殷骏. 粒子群优化的 Contourlet 域数字全息再现像增强[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0809002.
- [8] da Cunha A L, Zhou J, Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [9] Zhou Y, Li Q W, Huo G Y. Adaptive image enhancement based on NSCT coefficient histogram

- matching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2214-2222.
- 周妍, 李庆武, 霍冠英. 基于非下采样 Contourlet 变换系数直方图匹配的自适应图像增强[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2214-2222.
- [10] Li J, Yang Y C, Dang J W, et al. Multi-focus image fusion based on NSCT and guided filtering [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 071007.
- 李娇, 杨艳春, 党建武, 等. 基于 NSCT 与引导滤波的多聚焦图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 071007.
- [11] Liu D M, Chang F L. Coarse-to-fine saliency detection based on non-subsampled contourlet transform enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0115003.
- 刘冬梅, 常发亮. 基于非下采样轮廓小波变换增强的从粗到精的显著性检测[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0115003.
- [12] Shao S, Guo Y F, Liu H, et al. Low-illumination remote sensing image enhancement in HSI color space [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 2092-2099.
- 邵帅, 郭永飞, 刘辉, 等. HSI 色彩空间下的低照度遥感图像增强[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 2092-2099.
- [13] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [14] Wang J, Wu X S. Medical image fusion based on improved guided filtering and dual-channel pulse coupled neural networks [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 151004.
- 王建, 吴锡生. 基于改进的引导滤波和双通道脉冲耦合神经网络的医学图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(15): 151004.
- [15] Land E H, McCann J J. Lightness and Retinex theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, 61(1): 1-11.
- [16] Drago F, Myszkowski K, Annen T, et al. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3): 419-426.
- [17] Li Z G, Zheng J H, Zhu Z J, et al. Weighted guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(1): 120-129.
- [18] Liu S Q, Hu S H, Xiao Y, et al. Bayesian Shearlet shrinkage for SAR image de-noising via sparse representation [J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2014, 25(4): 683-701.
- [19] Tong Y, Zhao M R, Wei Z L, et al. Synthetic aperture radar image nonlinear enhancement algorithm based on NSCT transform [J]. *Physical Communication*, 2014, 13: 239-243.
- [20] Abdullah-Al-Wadud M, Kabir M H, Dewan M A A, et al. A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53(2): 593-600.
- [21] Demirel H, Ozcinar C, Anbarjafari G. Satellite image contrast enhancement using discrete wavelet transform and singular value decomposition[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 333-337.
- [22] Wang J J, Jia Z H, Qin X Z, et al. Image enhancement algorithm based on NSCT and fuzzy contrast [J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(10): 2754-2758.
- 王静静, 贾振红, 覃锡忠, 等. 基于 NSCT 与模糊对比度的图像增强算法[J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(10): 2754-2758.