

基于引导滤波算法的绝缘子憎水性 图像去噪研究

袁文海¹, 刘彪¹, 王喆¹, 赛涛¹, 宋昆峰¹, 夏鑫², 汪飒², 钟理鹏²

(1. 国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410000)

摘要:复合绝缘子憎水性检测是保障绝缘子安全可靠运行的重要手段,其中从憎水性图像中有效去除噪声并保持边缘信息是进行绝缘子憎水性识别的重要前提。使用思路简单,运算复杂度低且滤波过程能有效克服梯度反转问题的引导滤波算法进行憎水性图像处理。在此背景下,首先分析了引导滤波的原理;然后结合憎水性图像本身的特点,将引导滤波引入憎水性图像去噪处理中;最后通过滤波实验和定量实验结果分析验证引导滤波算法在憎水性图像边缘提取预处理中的良好效果。

关键词:引导滤波;梯度域;复合绝缘子;憎水性;边缘提取

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.018 中图分类号:TM855 文章编号:1673-9140(2021)03-0134-06

Denoising of insulator hydrophobic image based on the guided filtering algorithm

YUAN Wenhai¹, LIU Biao¹, WANG Zhe¹, SAI Tao¹, SONG Kunfeng¹,
XIA Xin², WANG Feng², ZHONG Lipeng²

(1. Urumqi Power Supply Company, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: The hydrophobic detection of composite insulators is an important means to ensure the safe and reliable operation of insulators. The effective elimination of noise from hydrophobic images is an important prerequisite for accurately extracting the edge of water droplets and realizing the hydrophobic identification of insulators. The guiding filtering algorithm is widely applied in the field of image processing because of its intuitive principle, low computational complexity and its ability to effectively overcome the gradient inversion problem by the guiding image filtering. In this context, the principle of guided filtering is analyzed firstly. Then, it is introduced into the denoising process of hydrophobic image based on the image characteristics. Finally, the results of filtering experiment and quantitative experiment are analyzed to verify the good effect of the guided filtering algorithm in the preprocessing of hydrophobic image edge extraction.

Key words: guided filtering; gradient domain; composite insulator; hydrophobicity; edge extraction

复合绝缘子以其憎水性和憎水迁移特性而具有良好的抗污闪性能,从而在电力系统输电线路中得到广泛的使用^[1]。复合绝缘子在正常运行过程中,昼夜温差、雨水侵蚀、风沙覆盖、外力破坏等物理因素都会对复合绝缘子的电气性能和机械性能造成破坏,使得复合绝缘子伞裙加速老化、绝缘子憎水性下降甚至丧失,最终引起输电线路发生污闪^[2-4]。为保障输电线路安全稳定运行,通过对绝缘子憎水性图像的处理分析,以准确判断当前绝缘子的老化和受损程度,并对其未来老化趋势做出预测具有重要工程意义^[5-6]。

自绝缘子憎水性检测领域开始使用喷水分级法自动识别绝缘子憎水性等级以来,憎水性判定结果受操作人员主观意识影响的痼疾得到有效地缓解,但在憎水性图像的采集和传输过程中所引入的噪声,对图像处理结果的影响逐渐凸显。针对憎水性图像滤波并较好保持图像边缘特征这一问题,已有学者提出多种解决方法,文献[7]在非下采样 Contourlet 变换域中,针对憎水性图像相关特性,分析图像有用信息与干扰噪声,提出基于非下采样 Contourlet 变换复合绝缘子憎水性图像去噪算法;文献[8]提出一种基于 Canny 算子和数学形态学的图像边缘检测方法,采用自适应局部灰度均衡及形态学的自适应阈值分割,降低噪声影响,保持边缘细节,但该算法尚存在客观缺陷;文献[9]分析复合绝缘子图像采集的多变性及表面水珠的特殊性,指出传统 Canny 算法对噪声过于敏感、容易丢失边缘细节部分和自动化程度低等缺陷。针对这些缺陷,文献[10]提出一种联合小波去噪和多尺度 Retinex 处理方法的改进 Canny 算法,但算法的改进使得算法本身变得极其复杂。

该文针对引导滤波器具有保边平滑特性,可以较好地保留源图像的轮廓、细节和纹理等信息的优势^[11-12],将局部滤波方法中的引导滤波算法引入憎水性图像滤波处理。首先分析了引导滤波算法的基本原理并编程实现该算法;然后设置对照实验、使用结构相似性(structural similarity,SSIM)评价法、峰值信噪比(peak signal to noise ratio,PSNR)评价法等客观评价方法来评价引导滤波算法的滤波效果;最后对实验结果进行分析,得出实验结论。

1 引导滤波原理

在对绝缘子憎水性等级判定的过程中,有效去除图像噪声并提取水珠轮廓是最为重要的步骤,水珠边缘也是憎水性图像最为重要的特征信息。因此,对图像进行滤波的同时保持边缘特性,是后续憎水性图像特征提取和图像分级的重要前提。一幅图像可视为图像基础层和图像细节层的叠加,反过来,也可以将一幅图像分解为反映图像本质部分和边缘信息的基础层和反映图像细节纹理信息和噪声点的细节层^[13],如图 1 所示,在滤波过程中,只要能尽可能滤除细节层信息同时保留图像基本层,就达到了边缘保持的目的。



图 1 图像分解

Figure 1 Image decomposition

引导滤波即是建立在此图像叠加理论上的一种基于局部线性模型的边缘保持算法。局部线性模型认为某函数上一点与其邻近部分的点成线性关系,一个复杂的函数可以用很多局部的线性函数来表示,当需要该函数上某一点的值时,只需要计算所有包含该点的线性函数的值并取平均值即可。引导滤波就是将图像视作一个复杂二维函数,分别对图像每一个局部线性关系滤波,最终累加推导出图像整体的滤波结果,这也就将输出图像定义为一个与引导图像有关的局部线性模型^[14-16],简化了输入图像与输出图像之间的关系。

在此局部线性叠加模型的理论基础上,将期望输出的基础层与引导图像之间的线性关系定义为如下模型:

$$Q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (1)$$

式中 Q 为输出图像; I 为引导图像; a_k 、 b_k 为引导图像在以像素点 k 为中心,半径为 r 的局部窗口 ω_k 内的线性系数; N 为图像细节层。原始图像 P 、引导图像 I 和滤波输出图像 Q 三者之间的线性关系如图 2 所示。

对式(1)两边取梯度,可得:

$$\partial Q_i = a_k \partial I_i \quad (2)$$

当引导图像 I 有梯度时,输出图像 Q 也有类似的梯度,所以当引导图为输入图像本身时,引导滤波具有边缘保持特性。

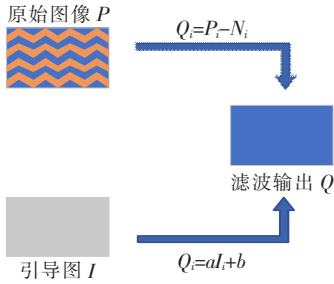


图 2 原始图像 P 、引导图像 I 和滤波输出图像 Q 三者之间的线性关系

Figure 2 Linear relationship among original image P , guided image I , and filtered image Q

2 引导滤波算法实现

引导滤波的算法实现关键是对式(1)线性关系的拟合,找到最为合适的线性系数,从而得到的输出图像能最大程度地滤除细节层并保持边缘特征。算法使用最小二乘法来拟合线性关系^[17],其代价函数:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_i + b_k - P_i)^2 + \epsilon a_k^2) \quad (3)$$

为提取边缘特性,式(3)中的引导图像 I 为待滤波图像 P 本身; ϵ 为一个用来防止 a_k 过大的正则化参数,其具体取值由调用时人为指定,可以直接影响滤波效果。

利用最小二乘法原理,令

$$\frac{\partial E(a_k, b_k)}{\partial a_k} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial E(a_k, b_k)}{\partial b_k} = 0 \quad (5)$$

联立式(4)、(5)求解,得

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} I_i P_i - \mu_k \bar{P}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon} \quad (6)$$

$$b_k = \bar{P}_k - a_k \mu_k \quad (7)$$

式(6)、(7)中 μ_k 、 σ_k^2 分别为引导图像 I 在半径为 r ,中心为 k 的局部窗口 ω_k 内的均值与方差; $|\omega|$ 为

窗口 ω_k 内元素总数; \bar{P}_k 为输入图像 P 在窗口 ω_k 内的均值;在计算每个窗口的线性系数时,存在部分像素点被多个窗口包含的情况,也即每个像素都由多个线性函数所描述^[18]。因此,如前文所述,要具体求某一点的输出值时,需将所有包含该点的线性函数值取平均^[17],最后得到线性模型:

$$Q_i = \bar{a}_k I_i + \bar{b}_k, \forall i \in \omega_k \quad (8)$$

$$\sum_{k | i \in \omega_k} a_k = \sum_{i \in \omega_k} a_k \quad (9)$$

因此,线性系数为

$$\bar{a}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} a_k, \bar{b}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} b_k \quad (10)$$

又由式(2)可知,引导滤波算法具有边缘保持特性,且输出图像的梯度保持程度由系数 a_k 决定。 a_k 越小,输出图像 Q 所保有的梯度信息越少,平滑力度就越大,图像边缘越模糊; a_k 越大,输出图像 Q 所保有的梯度信息越多,平滑力度就越小,图像边缘越清晰。此外,引导滤波还使用 ϵ 和 a_k 共同决定输出图像的边缘保持度和平滑程度。式(3)中的正则化参数 ϵ 取值范围在 0 到 1 之间, ϵ 越小,叠加平滑倍数越小; ϵ 越大,叠加平滑倍数越大。综上所述,以流程图的形式描绘了引导滤波的完整过程,如图 3 所示。

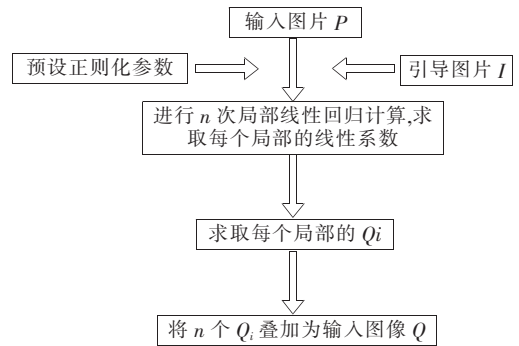


图 3 引导滤波算法流程

Figure 3 Flow chart of guided filtering

由图 3 算法流程可以进一步发现,引导滤波算法计算过程不存在迭代环节,时间复杂度可达到线性阶 $O(n)$ 水平,因此计算效率会显著提高。

3 仿真分析

3.1 实验方案

由第 2 节分析可知,引导滤波的滤波效果由正

则化参数 ϵ 和局部窗口半径 r 共同决定,所以,实验设置了与双边滤波算法的滤波效果对照实验和通过改变正则化参数 ϵ 和局部窗口半径 r 来观察引导滤波参数变化对其边缘保持效果的影响,对实验结果的评价分别使用主观判别法、SSIM 评价法、PSNR 评价法 3 种评价体系。

SSIM 和 PSNR 指标常被用在经滤波、压缩等操作后重构图像质量的评价上。对于 2 幅图像 X 与 Y ,尺寸大小为 $m \times n$,计算其 2 种评价指标的过程为

$$\begin{cases} M_{SE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \| X(i, j) - Y(i, j) \|^2 \\ P_{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{M_{AX-1}}{M_{SE}} \right) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + c_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1} \\ c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + c_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2} \\ s(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + c_3}{\sigma_x\sigma_y + c_3} \end{cases} \quad (12)$$

$$[S_{SIM} = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma]$$

式(11)中 P_{SNR} 为信号最大功率与信号噪声功率之比, dB; M_{SE} 为当前图像 X 与 Y 的均方误差; M_{AX-1} 为图像点颜色的最大值。一般而言,30 dB 以下的图像劣化较为明显, P_{SNR} 值越大,则图像滤波效果越好。

结构相似性 SSIM 是一种衡量 2 幅图像相似度的指标,从图像组成的角度出发,反映了图像亮度、对比度和结构 3 个方面的失真程度,式(12)中, l 、 c 、 s 分别为 X 与 Y 的亮度、对比度和结构, α 、 β 、 γ (都大于 0)为 S_{SIM} 参数调整, μ_x 、 μ_y 分别为 X 与 Y 的均值, σ_x 、 σ_y 分别为方差, σ_{xy} 为协方差, c_1 、 c_2 、 c_3 为常数。 S_{SIM} 是一个 0 到 1 之间的数,越大表示输出图像质量越好。

3.2 结果分析

将 3 幅不同老化等级的憎水性图像进行双边滤波和引导滤波实验,得到的滤波图像如图 4 所示, SSIM 和 PSNR 评价指数和算法运算时间见表 1。

图 4 中的图像结合表 1 中的数据对比,可以看出,对不同条件下的不同老化程度绝缘子憎水性图

像进行滤波时,引导滤波在边缘保持和滤除噪声点上都优于双边滤波。而且引导滤波与双边滤波的算法执行时间相差一个数量级,说明引导滤波在提高滤波效果的同时计算效率也有较大提高。

引导滤波参数局部窗口半径 r 分别设置为 2、8,对应正则化参数 ϵ 设置为 0.01、0.08、0.16 时对一幅憎水性图像进行滤波得到的 6 组滤波图像 SSIM 指数和 PSNR 指数结果如表 2 所示。

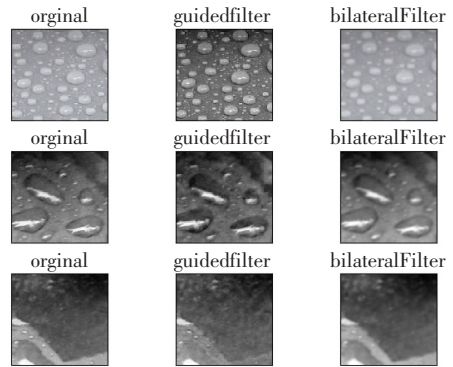


图 4 引导滤波与双边滤波主观效果对比

Figure 4 Subjective effects comparison of guided filtering and bilateral filtering

表 1 2 种滤波算法对应的 SSIM 评价结果

Table 1 SSIM indexes corresponding to the filtering algorithms in Figure 4

组别	滤波算法	S_{SIM}	P_{SNR}/dB	运行时间/s
1	双边滤波	0.754 3	74.153 8	2.216 3
	引导滤波	0.899 2	86.722 6	0.160 3
2	双边滤波	0.721 4	74.211 5	2.535 9
	引导滤波	0.905 6	86.847 2	0.157 8
3	双边滤波	0.742 9	73.972 8	2.379 2
	引导滤波	0.916 3	87.021 6	0.164 7

表 2 引导滤波调整参数的 SSIM 和 PSNR 评价结果

Table 2 SSIM and PSNR indexes of guided filtering adjustment parameters

ϵ	评价指标	$r=2$	$r=8$
0.01	SSIM	0.961 2	0.928 6
	PSNR	87.535 6	87.321 9
0.08	SSIM	0.958 4	0.907 5
	PSNR	86.982 9	86.748 3
0.16	SSIM	0.952 7	0.893 2
	PSNR	85.948 7	85.924 7

观察发现,表2中的SSIM指标和PSNR指标变化情况符合3.1节分析所预期的变化趋势。同时,SSIM指标均在0.9左右浮动,PSNR指标也在85以上,相比于双边滤波等其他滤波方法,引导滤波对憎水性图像的滤波效果更优。

4 结语

该文将图像处理领域具有良好边缘保持特性的引导滤波算法引入憎水性图像预处理环节,构造了更为简洁的滤波流程,加快了运算速度,同时保持了对水珠边缘的有效提取;从局部线性优化的过程角度解构了引导滤波的计算步骤后,又从数学角度解释了其边缘保持特性,由此得出了影响滤波效果的两大技术指标;最后,不同等级憎水性图像在不同滤波参数下的SSIM指标和PSNR指标量化分析结果,验证了该滤波算法的卓越滤波性能。

参考文献:

- [1] 吴胜磊,滕松,刘振华,等. 数据驱动的绝缘子积污特征量识别与污秽度预测[J]. 电力工程技术,2019,38(6):179-186.
- WU Shenglei, TENG Song, LIU Zhenhua, et al. Identification of pollution characteristics of transmission line insulator and pollution prediction based on data driven[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 179-186.
- [2] 黄宵宁,刘锦,杨成顺,等. 典型表面状态下的绝缘子空间电场特性研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):144-150.
- HUANG Xiaoning, LIU Jin, YANG Chengshun, et al. Electric field characteristics of polluted insulator space under typical surface state[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 144-150.
- [3] 杨哲,樊平,王庆丰,等. 高压输电线路用复合绝缘子内部间隙电场分析[J]. 电网与清洁能源,2019,35(6):1-8.
- YANG Zhe, FAN Ping, WANG Qingfeng, et al. Analysis of the electric field through internal gap of composite insulator used in HV transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(6): 1-8.
- [4] 王华倩,王胜辉,杨广华,等. 复合I型绝缘子的直流鸟粪闪络特性研究[J]. 电测与仪表,2020,57(2):69-73.
- WANG Huaqian, WANG Shenghui, YANG Guanghua, et al. Study on the bird streamer flashover characteristics of I-type composite insulator string[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 69-73.
- [5] 吴高林,周庆,肖前波,等. 复合绝缘子污闪与冰闪特性及临界闪络电流研究[J]. 中国电力,2019,52(4):59-65.
- WU Gaolin, ZHOU Qing, XIAO Qianbo, et al. Study on icing and contamination flashover characteristics and critical flashover current of composite insulators[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 59-65.
- [6] 王黎明,李旭,曹彬,等. 基于BP神经网络的线路绝缘子表面泄漏电流预测[J]. 高压电器,2020,56(2):69-76.
- WANG Liming, LI Xu, CAO Bin, et al. Prediction of leakage current on insulator surface of transmission line based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 69-76.
- [7] 周力,肖萍,安义,等. 基于轮廓小波的图像信号去噪算法研究[J]. 世界科技研究与发展,2012,34(5):729-731.
- ZHOU Li, XIAO Ping, AN Yi, et al. Denoising algorithm of image signal based on nonsubsampling contourlet transform[J]. World Sci-tech R&D, 2012, 34(5): 729-731.
- [8] 殷峰,仲昭峰,高旭,等. 基于风沙区域绝缘子故障数据的配电线路风险评估方法[J]. 供用电,2020,37(11):28-33+41.
- YIN Feng, ZHONG Zhaofeng, GAO Xu, et al. Risk assessment method of distribution lines based on historical fault data of pin insulator in sandstorm area[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(11): 28-33+41.
- [9] Rong W, Li Z, Zhang W, et al. An improved Canny edge detection algorithm[C]//IEEE Mechatronics and Automation Conference, Tianjin, China: IEEE, 2014: 577-582.
- [10] 李浩然,高健,吴田,等. 基于改进Canny算子的绝缘子裂纹检测研究[J]. 智慧电力,2021,49(2):91-98.
- LI Haoran, GAO Jian, WU Tian, et al. Crack detection method of insulators based on improved canny operator[J]. Smart Power, 2021, 49(2): 91-98.
- [11] 李娇,杨艳春,党建武,等. NSST与引导滤波相结合的多聚焦图像融合算法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2018,

- 50(11):145-152.
- LI Jiao, YANG Yanchun, DANG Jianwu, et al. NSST and guided filtering for multi-focus image fusion algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(11):145-152.
- [12] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6):1397-1409.
- [13] 周玉钦. 基于引导滤波的边缘保持算法研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2016.
- [14] 周可慧, 廖志伟, 陈琳韬, 等. 基于双重背景分离及自适应网格的电压致热型设备红外图像状态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24):123-130.
- ZHOU Kehui, LIAO Zhiwei, CHEN Lintao, et al. Research on state analysis of voltage-heating equipment based on dual background separation and adaptive meshing of infrared image [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24):123-130.
- [15] 秦钟, 杨建国, 王海默, 等. 基于 Retinex 理论的低照度下输电线路图像增强方法及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3):150-157.
- QIN Zhongl, YANG Jianguo, WANG Haimo, et al. Low illumination transmission line image enhancement method and application based on the Retinex theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3):150-157.
- [16] 葛利跃, 张聪炫, 陈震, 等. 相互结构引导滤波 TV-L1 变分光流估计[J]. 电子学报, 2019, 47(3):707-713.
- GE Liyue, ZHANG Congxuan, CHEN Zhen, et al. Mutual-structure guided filtering based TV-L1 optical flow estimation[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(3):707-713.
- [17] 朱程涛, 李镛. 基于梯度域引导滤波的视差精炼迭代算法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(6):638-644.
- ZHU Chengtao, LI Qiang. Disparity refinement iterative algorithm based on gradient domain guided image filtering[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2018, 51(6):638-644.
- [18] 赵东, 周慧鑫, 秦翰林, 等. 基于引导滤波和核相关滤波的红外弱小目标跟踪 [J]. 光学学报, 2018, 38(2):46-53.
- ZHAO Dong, ZHOU Huixin, QIN Hanlin, et al. Infrared dim-small target tracking based on guided image filtering and kernelized correlation filtering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2):46-53.