

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200383

# 基于 Retinex 理论的低照度下输电线路图像增强方法及应用

秦钟<sup>1</sup>, 杨建国<sup>2</sup>, 王海默<sup>1</sup>, 杨佳睿<sup>3</sup>, 崔春晖<sup>4</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司银川供电公司, 宁夏 银川 750001; 2. 神华国能宁夏煤电有限公司鸳鸯湖电厂, 宁夏 银川 750410; 3. 国网宁夏电力有限公司检修公司, 宁夏 银川 750001; 4. 南京悠阔电气科技有限公司, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 为提高低照度环境下输电线路图像视频在线监测设备分析的准确性, 提出一种基于 Retinex 理论的低照度图像增强方法。首先采用改进型同态滤波算法增强低照度图像的 RGB 分量, 然后将图像转换至 HSV 色彩空间中。对多尺度 Retinex 算法增强图像进行改进, 采用双边滤波函数替代 Gaussian 函数作为 Retinex 算法的环绕函数, 引入色彩恢复函数进行图像色彩恢复, 入射分量采用幂律变换校正, 反射分量采用 Sigmoid 函数处理。最后将图像再转换至 RGB 空间得到增强后的输电线路图像。对实拍低照度输电线路图片进行仿真处理, 结果表明该方法可以有效提高低照度图像的对比度、清晰度和信息熵, 并在覆冰预警和异物识别中实现较好的应用。

**关键词:** 输电线路; 低照度图像; 图像增强; 多尺度 Retinex 算法; 色彩恢复; HSV 色彩空间

## Low illumination transmission line image enhancement method and application based on the Retinex theory

QIN Zhong<sup>1</sup>, YANG Jianguo<sup>2</sup>, WANG Haimo<sup>1</sup>, YANG Jiarui<sup>3</sup>, CUI Chunhui<sup>4</sup>

(1. State Grid Yinchuan Power Supply Company, Yinchuan 750001, China; 2. Yuanyanghu Power Plant of Shenhua Guoneng Ningxia Coal Power Co., Ltd., Yinchuan 750410, China; 3. State Grid Ningxia Maintenance Company, Yinchuan 750001, China; 4. Nanjing Youkuo Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of transmission line image and video online monitoring equipment analysis resulting in low illumination environment, a low illumination image enhancement method based on the Retinex theory is proposed. First, an improved homomorphic filtering algorithm is used to enhance the RGB component of a low illumination image. Then, the image is converted into the HSV color space. The multi-scale Retinex algorithm is improved to enhance the image. The Gaussian function is replaced by a bilateral filter function as the surrounding function of the Retinex algorithm. The color recovery function is introduced to restore the image color. Finally, the image is converted to the RGB space to obtain the enhanced transmission line image. The simulation results show that this method can effectively improve the contrast, clarity and information entropy of actual low illumination transmission line images. It can also be applied in ice cover warning and foreign body recognition.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGITG-2018ZXCG-FF).

**Key words:** transmission line; low illumination image; image enhancement; multi-scale Retinex algorithm; color restoration; HSV color space

## 0 引言

随着输电线路信息化和智能化运检建设的不断完善,我国 220 kV 电压等级以上的重要输电线路和

通道基本已部署图像和视频在线监测设备,可以有效实现线路覆冰在线监测、外力破坏预警、通道山火告警、异物识别判断分析和输电设备状态分析等功能<sup>[1-5]</sup>。但是由于高压输电线路多位于野外和山区,夜晚照明情况差、可见度低,同时易受雨雾天气的影响,图像和视频在线监测装置回传图像无法

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(SGITG-2018ZXCG-FF)

有效地反映现场实际情况<sup>[6-7]</sup>。因此,提高低照度下输电线路在线监测图像的辨识度,可以有效对输电线路运行状态进行准确分析。

在工程实际中,仅使用改变图片曝光度和亮度的方法无法有效增强目标图像的轮廓特征<sup>[8]</sup>。目前,国内外已有一些学者对在特殊复杂环境下的输电线路在线监测和带电检测拍摄图像增强方法进行了研究。文献[9]提出一种基于 V 域的小波变换图像处理方法,可以有效改善覆冰绝缘子图像的清晰度和对比度。文献[10]提出了一种双尺度滤波图像去雾算法,可以明显增强图像清晰度。文献[11]提出了一种多尺度 Retinex 图像增强去噪算法,可以实现复杂光照条件下的目标图像提取。文献[12]提出了一种基于 Laplace 锐化滤波和小波变换高频增强方法,可以有效增强目标图像轮廓特征。文献[13]提出了一种多尺度 Retinex 算法,可以消除光线对图像的影响。虽然以上方法在雪雾天气和复杂光照条件下可以取得较好的效果,但是对于光照条件较差时的低照度下输电线路图像增强效果并不明显。

本文提出了一种基于 Retinex 理论的低照度下输电线路图像增强方法。该方法首先采用改进型同态滤波算法增强低照度输电线路图像的 RGB(Red Green Blue, RGB)三色分量,并将 RGB 图像转换到色调-饱和度-亮度(Hue Saturation Value, HSV)彩色空间。采用改进型多尺度 Retinex 算法增强图像亮度分量,并对图像进行色彩恢复。在增强图像亮度计算过程中,入射分量采用幂律变换校正,反射分量采用 Sigmoid 函数处理。最后再将增图像从 HSV 空间转换回到 RGB 空间,得到亮度增强后的输电线路在线监测图像。

## 1 改进型同态滤波算法

### 1.1 同态滤波算法

同态变换可以将非线性组合信号变换成线性组合信号,使信号在频域上有明显区分,便于后续利用 Fourier 变换和滤波器进行处理<sup>[14]</sup>。对于低照度下的输电线路图像,图像灰度或色彩动态范围大,而目标部分灰度暗且动态范围小,较难显著区分目标轮廓。灰度线性变换虽然可以提高低照度区域目标图像的对比度,但是会降低高照度区域目标图像的灰度层次和细节,不利于后续的图像分析<sup>[15]</sup>。同态滤波算法基于图像的照射-反射模型,通过处理入射分量和反射分量对低照度输电线路图像进行增强。同态滤波算法将低照度图像  $f(x, y)$  设为照射强

度  $i(x, y)$  和反射强度  $r(x, y)$  的乘积,如式(1)所示。

$$f(x, y) = i(x, y) \times r(x, y) \quad (1)$$

由于图像光照一般为渐变形式,主要取决于光照条件,因此  $i(x, y)$  为低频分量;图像中各类物体对光的反射为突变形式,主要取决于物体表面特性,可以反映图像细节信息,因此  $r(x, y)$  为高频分量。对式(1)两边取对数,并进行 Fourier 变换,可以得到如式(2)和式(3)的图像线性组合的频率域。

$$\ln[f(x, y)] = \ln[i(x, y)] + \ln[r(x, y)] \quad (2)$$

$$FFT\{\ln[f(x, y)]\} = FFT\{\ln[i(x, y)]\} + FFT\{\ln[r(x, y)]\} \quad (3)$$

式(3)可以改写成式(4)的形式。

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (4)$$

在进行低照度输电线路图像时,需要降低低频分量  $i(x, y)$ ,从而降低图像动态范围;需要提高高频分量  $r(x, y)$ ,从而增强图像对比度。因此,可以采用高通滤波器对图像进行处理,从而实现抑制低频分量的目的。选择滤波函数  $H(u, v)$  对  $F(u, v)$  进行滤波处理,将其分成入射和反射分量,如式(5)所示。

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (5)$$

完成滤波处理后,对式(5)进行 Fourier 变换和取对数,可以得到滤波处理后的图像,完成低照度图像同态滤波的处理。

$$h_f(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (6)$$

$$g(x, y) = e^{h_f(x, y)} = e^{h_i(x, y)} e^{h_r(x, y)} \quad (7)$$

因此,在低照度图像的同态滤波计算过程中,滤波函数  $H(u, v)$  为影响图像处理效果的关键因素。

### 1.2 算法改进

在同态滤波算法中,常用的滤波函数主要包括 Gaussian 型、Butterworth 型和指数型<sup>[16]</sup>。但是这些滤波函数调节参数较多,需要多次仿真试验才可以得到最优结果。本文对传统同态滤波算法进行改进,提出一种新型传递函数模型,如式(8)所示,滤波函数如式(9)所示。该模型为一种改进型 S 曲线,调节参数少,且对低频分类抑制效果好。

$$s(t) = 1/(1 + x^{-t}) \quad (8)$$

$$H(u, v) = 1/(1 + D(u, v)^{-t}) \quad (9)$$

式中,  $D(u, v)$  为点  $(u, v)$  与滤波中点  $(u_0, v_0)$  直接的距离,可根据式(9)可以求解得出。

$$D(u, v) = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2} \quad (10)$$

通过分析式(9)可以得知,只需要调整参数  $t$  即可获得所需要的滤波结果,根据文献[15,17]的结论,  $t$  在取 0.001 时可以得到最佳滤波效果。

## 2 改进型多尺度 Retinex 算法

### 2.1 HSV 空间转换

HSV 颜色模型是根据颜色直观特性建立的颜色空间, 模型中颜色参数为色调  $H$ , 饱和度  $S$  和亮度  $V$ 。相比于 RGB 颜色模型, HSV 模型可以将图像亮度从色彩中提取出来进行处理, 因此 HSV 颜色空间可以在低照度图像增强算法中进行应用, 且图像色彩信息不会出现明显畸变<sup>[18]</sup>。在采用改进型同态滤波算法对低照度图像进行处理之后, 可以将处理后的图像从 RGB 颜色空间转换至 HSV 空间, 计算公式如式(11)一式(13)所示。

$$f_s(x, y) = \begin{cases} 0, & C_{\max} = 0 \\ \frac{\Delta}{C_{\max}}, & C_{\max} \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$f_v(x, y) = C_{\max} \quad (12)$$

$$f_H(x, y) = \begin{cases} 0^\circ, \Delta=0 \\ 60^\circ \times \left( \frac{G-B}{\Delta} \bmod 6 \right), C_{\max} = R \\ 60^\circ \times \left( \frac{B-R}{\Delta} + 2 \right), C_{\max} = G \\ 60^\circ \times \left( \frac{R-G}{\Delta} + 4 \right), C_{\max} = B \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $f_H(x, y)$  为色调图像  $f_s(x, y)$  为饱和度图像;  $f_v(x, y)$  为亮度图像;  $C_{\max} = \max(R, G, B)$ ;  $\Delta = C_{\max} - C_{\min}$ ,  $C_{\min} = \min(R, G, B)$   $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别为图像中红、绿、蓝三个基本颜色的灰度值, 取值范围均为 0~255;  $\max(R, G, B)$  和  $\min(R, G, B)$  为 RGB 分量中的最大值和最小值。在本文中对 HSV 空间中的饱和度分量  $S$  进行自适应非线性拉伸, 并采用多尺度 Retinex 算法增强图像亮度分量  $V$ 。最后再使用式(14)、式(15)将图像从 HSV 空间转换至 RGB 空间, 输出增强后的输电线路图像。

$$(R', G', B') = \begin{cases} (C, X, 0), & 0^\circ \leq H < 60^\circ \\ (X, C, 0), & 60^\circ \leq H < 120^\circ \\ (0, C, X), & 120^\circ \leq H < 180^\circ \\ (0, X, C), & 180^\circ \leq H < 240^\circ \\ (X, 0, C), & 240^\circ \leq H < 300^\circ \\ (C, 0, X), & 300^\circ \leq H < 360^\circ \end{cases} \quad (14)$$

$$(R, G, B) = ((R' + m) \times 255, (G' + m) \times 255, (B' + m) \times 255) \quad (15)$$

式中:  $C = V \times S$ ;  $m = V - C$ ;  
 $X = C \times (1 - |H / 60^\circ| \bmod 2 - 1)$ 。

### 2.2 Retinex 理论及系列算法

#### 2.2.1 单尺度 Retinex 算法

基于 Retinex 理论, 图像的亮度由采集时环境亮度和图像中物体表面反射光的强度决定, 其表达式如式(16)所示。

$$I(x, y) = L(x, y) \times R(x, y) \quad (16)$$

式中:  $I(x, y)$  为采集到的图像;  $L(x, y)$  为环境光照入射分量;  $R(x, y)$  为目标物体反射分量。其中入射分量决定图像整体亮度和动态范围, 反射分量可以反映出目标物体的图像信息。因此, 单尺度 Retinex 算法的原理是对整个图像的环境光照入射分量进行估计, 再从原始图像中减去入射分量, 最终得到可以反映目标物体信息的反射分量, 其表达式如式(17)所示。

$$\lg[R(x, y)] = \lg[I(x, y)] - \lg[L(x, y)] \quad (17)$$

在传统单尺度 Retinex 算法中, 一般采用 Gaussian 低通滤波器估计环境光照入射分量, 如式(18)和式(19)所示。

$$L(x, y) = F(x, y) * I(x, y) \quad (18)$$

$$F(x, y) = K e^{-(x^2+y^2)/\sigma^2} \quad (19)$$

式中:  $F(x, y)$  为 Gaussian 环绕函数;  $K$  为归一化因子;  $\sigma$  为  $F(x, y)$  的尺度因子。

此外采用 Gaussian 低通滤波器, 可以估计出低照度图像的低频分量, 再从原图像中减去这类低频环境光照入射分量, 可以得到原图像的高频分量。低照度图像中的高频分量可以反映目标物体的视觉信息, 实现了增强图像的目的。综上分析可得, 低照度图像中第  $i$  像素通道采用单尺度 Retinex 算法得到的高频反射分量为

$$R_i(x, y) = \lg I_i(x, y) - \lg[F(x, y) * I_i(x, y)] = \lg \{ I_i(x, y) / [F(x, y) * I_i(x, y)] \} \quad (20)$$

但是由于尺度因子  $\sigma$  的不确定性, Gaussian 滤波器处理后的图像会出现边缘模糊和目标图像色彩失真的问题, 需要对该算法进行改进<sup>[19]</sup>。

#### 2.2.2 多尺度 Retinex 算法

多尺度 Retinex 算法在单尺度 Retinex 算法的基础上, 对单张低照度图像进行多个尺度因子计算, 并将计算结果线性叠加, 如式(21)所示。

$$R_i(x, y) = \sum_{i=1}^k W_k \{ \lg I_i(x, y) - \lg[F_k(x, y) * I_i(x, y)] \} \quad (21)$$

式中:  $W_k$  为不同尺度的权重系数, 且所有尺度  $W_k$  之和为 1;  $k$  为 Gaussian 环绕函数个数, 一般为 3, 代表高、中、低三个尺度;  $F_k(x, y)$  为尺度因子等于  $\sigma_k$

时的 Gaussian 环绕函数。多尺度 Retinex 算法可以有效保持增强后低照度图像的细节特征和色彩相同。

## 2.3 算法改进

### 2.3.1 多尺度 Retinex 算法改进

传统多尺度 Retinex 算法的环绕函数为 Gaussian 函数, 图像处理后易出现光晕现象<sup>[19]</sup>。与高斯滤波器相比, 双边滤波器为加权非线性滤波器, 在取得较好去噪效果的同时, 可以增强图像平滑性, 保留图像边缘信息, 抑制光晕的出现。因此, 本文采用双边滤波函数替代 Gaussian 函数作为 Retinex 算法的环绕函数, 对传统算法进行改进。双边滤波函数的定义为

$$I(x, y) = \frac{\sum_{m, n \in W_k} d(x, y, m, n) \lambda(x, y, m, n) f(x, y, m, n)}{\sum_{m, n \in W_k} d(x, y, m, n) \lambda(x, y, m, n)} \quad (22)$$

$$d(x, y, m, n) = e^{-\frac{(x-m)^2 + (y-n)^2}{2\sigma_d^2}} \quad (23)$$

$$\lambda(x, y, m, n) = e^{-\frac{|f(x, y) - f(m, n)|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (24)$$

式中:  $W_k$  为双边滤波器窗口宽度;  $f(x, y, m, n)$  为领域内以  $(x, y)$  为中心的像素值;  $\sigma_d$  和  $\sigma_r$  分别为定义域和值域方差。

### 2.3.2 色彩恢复改进

为解决多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex, MSR)算法出现的颜色失真问题, 引入颜色恢复函数  $C_i(x, y)$ , 得到带颜色恢复的多尺度 Retinex(Multi-Scale Retinex with Color Restoration, MSR-CR)算法, 其计算表达式为

$$f_{\text{MSR-CR}}(x, y) = C_i(x, y) f_{\text{MSR}}(x, y) \quad (25)$$

$$C_i(x, y) = b \times \log \left[ a \times \frac{f_{\text{MSR}_i}(x, y)}{\sum_{i \in \{H, S, V\}} f_{\text{MSR}_i}(x, y)} \right] \quad (26)$$

式中:  $a$  为非线性变换强度;  $b$  为增益常数;  $i$  为某个颜色通道。

### 2.3.3 幂律变换校正

幂律变换校正又称 Gamma 校正, 可以使亮度增强后的颜色动态范围趋势与原始图像近似, 在本文中对双边滤波后的入射分量  $L(x, y)$  进行幂律变换校正, 如式(27)所示。

$$L'(x, y) = s [L(x, y)]^{\frac{1}{\gamma}} \quad (27)$$

式中,  $s$  和  $\gamma$  为校正常数。

### 2.3.4 Sigmoid 函数

Sigmoid 函数可以模拟图像非线性和局部特征, 可以压缩函数的动态范围及增强图像细节, 其具体定义在文献[20]中有详细介绍, 本文不再复述。引入 Sigmoid 函数对图像反射分量进行拉伸, 对公式(21)中的对数函数进行替换, 如式(28)所示。

$$R_i(x, y) = \sum_{k=1}^K W_k \times \text{Sigmoid} \left[ \frac{I_i(x, y)}{F_k(x, y) * I_i(x, y)} \right] \quad (28)$$

## 3 仿真计算及分析

### 3.1 计算流程

本文提出的低照度输电线路图像增强算法的计算流程如图 1 所示。

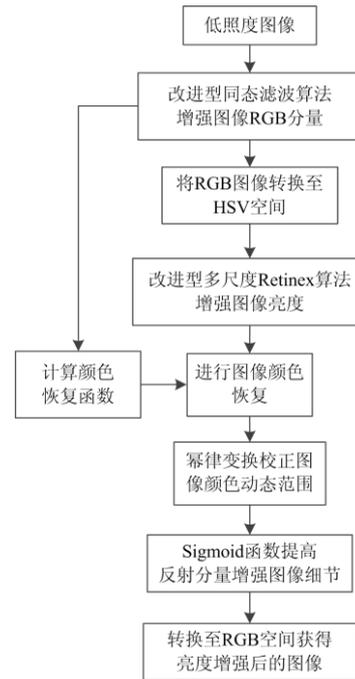


图 1 低照度输电线路图像增强计算流程

Fig. 1 Image enhancement calculation flow of low illumination transmission line

### 3.2 图像处理及分析

利用本文提出的图像增强算法对低照度输电线路图像进行处理, 原图如图 2 所示。计算软件为 Matlab 2014b, 计算机配置为: 处理器 Inter i5-7200U, 处理器主频 2.7 GHz, 计算机内存为 8 GB。本文提出算法参数设置为:  $s=0.01$ ,  $\gamma=3$ ,  $a=2.71$ ,  $b=0.83$ 。图像增强处理后的图片如图 3 所示。结果表明, 本文提出的输电线路低照度图像增强方法, 可以有效提高图像亮度并突出目标物图像细节, 且不会出现色彩失真和物体边缘模糊的情况。



图 2 原始低照度输电线路图像

Fig. 2 Original low illumination transmission line image



图 3 提出算法增强后的输电线路图像

Fig. 3 Image of transmission line is enhanced by the proposed algorithm

为验证本文提出算法的有效性，选择表 1 中的各类低照度图像增强算法进行图像处理，并选择对比度、清晰度和信息熵三种评价参数对图像处理效果进行评价，评价参数的定义如下。

1) 清晰度  $Q$

图像的清晰度为图像中所有像素的平均值，其值越高表明图像的亮度越高，该参数定义为

$$Q = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I(i, j) \quad (29)$$

式中， $M$  和  $N$  分别为图像在  $x$  和  $y$  轴方向上的像素个数。

表 1 低照度图像增强算法

Table 1 Low illumination image enhancement algorithms

计算方法	采用算法
算法 1	传统型多尺度 Retinex 算法
算法 2	文献[10]算法
算法 3	文献[12]算法

2) 对比度  $D$

图像对比度由图像像素的方差计算可得，方差越大表明图像的对比度越强，参数定义为

$$D = \left\{ \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [I(i, j) - Q]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (30)$$

3) 信息熵  $E$

图像的信息熵为图像中所包含信息量的和，其值越高表明图像中各目标物体信息越多，该参数定义为

$$E = - \sum_{i=0}^{255} p(r_i) \log [p(r_i)] \quad (31)$$

式中， $p(r_i)$  为第  $i$  个像素的概率值。

各类方法图像处理结果如图 4 所示，评价参数的计算结果如表 2 和表 3 所示。结果表明：1) 与其他算法相比，本文算法处理后的低照度图像的清晰度、对比度和信息熵参数较高；2) 由于采用双边滤波函数替代 Gaussian 函数作为 Retinex 算法的环绕函数，本文算法增强后的图像平滑性更好，没有明显光晕出现，图像中导线和周围树木等目标物边缘清晰；3) 由于引入了颜色恢复函数，本文算法增强后的图像对比度和信息熵较高；4) 由于采用了幂律变换校正，本文算法增强后的图像在亮度最高的同时，信息熵代表的颜色动态范围变化也较为明显，利于后续的图像识别等工作；5) 由于引入了 Sigmoid 函数，本文算法增强后的图像细节最为丰富，可清晰显示出导线、树木等目标物的图像细节。

表 2 示例图像 1 评价参数

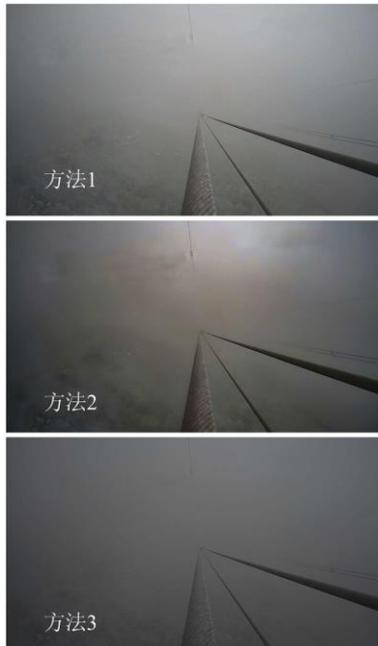
Table 2 Evaluation parameters image sample 1

计算方法	清晰度 $Q$	对比度 $D$	信息熵 $E$
本文算法	143.72	62.21	5.834
算法 1	85.11	34.68	4.281
算法 2	110.36	43.79	4.396
算法 3	53.89	28.50	3.247

表 3 示例图像 2 评价参数

Table 3 Evaluation parameters image sample 2

计算方法	清晰度 $Q$	对比度 $D$	信息熵 $E$
本文算法	138.32	67.88	5.239
算法 1	52.53	46.40	4.110
算法 2	76.21	39.26	3.217
算法 3	64.72	48.71	4.089



(a) 示例图像 1



(b) 示例图像 2

图 4 各类低照度图像增强算法处理结果

Fig. 4 Processing results of each kind of low illumination image enhancement algorithms

## 4 低照度图片处理及应用

### 4.1 输电线路覆冰图像处理

采用本文提出算法对某条 500 kV 输电线路覆冰图片进行处理, 处理前后图像如图 5 所示。图像拍摄时间为傍晚, 且伴随雨雾。采用文献[21]方法对覆冰厚度进行计算, 图像增强前后的计算结果分别为 1.2 cm 和 3.0 cm, 融冰后运维人员实际测量结果为 2.7 cm。结果表明, 本文提出的低照度图像增强方法可以有效提高输电线路覆冰在线监测冰层厚度的准确性。



图 5 处理前后的覆冰线路图像

Fig. 5 Iced lines image before and after processing

### 4.2 输电线路异物图像处理

采用本文提出算法对某条 500 kV 输电线路通道图像进行处理, 处理前后图像如图 6 所示。



图 6 处理前后的输电线路图像

Fig. 6 Transmission lines image before and after processing

拍照时间为清晨, 能见度低。采用文献[22]的方法对输电线路异物进行识别: 图像增强处理前未识别出异物; 图像增强处理后计算结果为导线 B 相上有异物, 现场巡视发现导线上悬挂农业大棚用塑料薄膜。结果表明, 本文提出的低照度图像增强方法可以使图像视频监控在低照度条件下进行输电线路异物识别, 有效降低线路跳闸率<sup>[23]</sup>。

## 5 结论

1) 本文提出一种基于 Retinex 理论低照度下输电线路图像增强方法, 首先采用改进型同态滤波算法增强低照度输电线路图像的 RGB 分量并转换至 HSV 空间, 再采用改进型多尺度 Retinex 算法增强图像亮度, 该方法可以有效提高图像的清晰度和对比度, 并增强图像中目标物的特征信息。

2) 本文提出的多尺度 Retinex 算法改进方法, 可以增强图像清晰度和对比度, 处理后的图像色彩不发生明显失真, 图像中不出现明显光晕。

3) 本文提出的图像增强方法, 可以有效提高低照度下输电线路覆冰在线监测和异物识别的准确性, 具有较好的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 庄文兵, 祁创, 王建, 等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 87-94.  
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, WANG Jian, et al. Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 87-94.
- [2] 尹晖, 张晓鸣, 李小祥, 等. 基于视频监控的输电线路舞动信息提取与频谱分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2889-2895.  
YIN Hui, ZHANG Xiaoming, LI Xiaoxiang, et al. Galloping information extraction and spectral analysis for transmission lines based on video monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2889-2895.
- [3] 熊小伏, 曾勇, 王建, 等. 基于山火时空特征的林区输电通道风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 1-9.  
XIONG Xiaofu, ZENG Yong, WANG Jian, et al. Risk assessment of power transmission channels in forest regions based on spatial-temporal features of forest fire[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 1-9.
- [4] 龚钢军, 张帅, 吴秋新, 等. 基于 TensorFlow 的高压输电线路异物识别[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 204-209, 216.  
GONG Gangjun, ZHANG Shuai, WU Qiuxin, et al. Foreign body identification based on TensorFlow for high voltage transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 204-209, 216.
- [5] 赖秋频, 杨军, 谭本东, 等. 基于 YOLOv2 网络的绝缘子自动识别与缺陷诊断模型[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 31-39.  
LAI Qiupin, YANG Jun, TAN Bendong, et al. An automatic recognition and defect diagnosis model of transmission line insulator based on YOLOv2 network[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 31-39.
- [6] 魏文力, 李宝树, 崔克彬, 等. 基于改进的最大熵航拍输电线路图像复原方法[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(32): 9701-9706.  
WEI Wenli, LI Baoshu, CUI Kebin, et al. Based on the improved maximum entropy aerial transmission line method for image restoration[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(32): 9701-9706.
- [7] 吕宁. 基于深度学习的输电线路防外力破坏监测系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.  
Lǚ Ning. Research on the surveillance system of preventing from external damage for transmission line based on deep learning[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [8] 李庆忠, 赵峰, 牛炯. 低照度图像自适应颜色校正与对比度增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31(12): 2121-2128.  
LI Qingzhong, ZHAO Tong, NIU Jiong. Adaptive color correction and contrast enhancement algorithm for low illumination images[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2019, 31(12): 2121-2128.
- [9] 黄新波, 李菊清, 张焯, 等. 复杂环境下覆冰绝缘子识别检测技术[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 891-899.  
HUANG Xinbo, LI Juqing, ZHANG Ye, et al. Recognition and detection technology of ice-covered insulators under complex environment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 891-899.
- [10] 刘宁. 高压输电线路智能检测技术研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2018.  
LIU Ning. Research and application of intelligent detecting technology for high voltage transmission line[D]. Jinan: Shandong University, 2018.

- [11] 杨亚明. 基于 OpenCV 的绝缘子及等电位线故障状态智能识别[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
YANG Yaming. Fault state intelligent recognition of insulator and isoelectric line based on OpenCV[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [12] 解加盈, 郭鹏. 基于多变量选择的深度神经网络功率曲线建模[J]. 华电技术, 2019, 41(8): 27-31, 52.  
XIE Jiaying, GUO Peng. Deep neural network modeling on power curve based on multi-variable selection[J]. Huadian Technology, 2019, 41(8): 27-31, 52.
- [13] 王思源, 王金胜, 严玺, 等. 输电线路状态检测图像的增强算法研究[J]. 电气自动化, 2016, 38(6): 77-79.  
WANG Siyuan, WANG Jinsheng, YAN Xi, et al. Research on enhanced algorithm for state monitoring image of electric transmission line[J]. Electrical Automation, 2016, 38(6): 77-79.
- [14] LI Jiayuan, HU Qingwu, AI Mingyao. Haze and thin cloud removal via sphere model improved dark channel prior[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(3): 472-476.
- [15] 董静薇, 徐博, 马晓峰, 等. 基于同态滤波及多尺度 Retinex 的低照度图像增强算法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(22): 238-242.  
DONG Jingwei, XU Bo, MA Xiaofeng, et al. Low-intensity image enhancement algorithm based on homomorphic filtering and multi-scale Retinex[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(22): 238-242.
- [16] 康丰, 齐以年, 张玮, 等. 中性点不接地系统对距离保护的影响分析[J]. 华电技术, 2019, 41(4): 33-37.  
KANG Feng, QI Yinian, ZHANG Wei, et al. Influence analysis of ungrounded neutral system on distance protection[J]. Huadian Technology, 2019, 41(4): 33-37.
- [17] 田小平, 程新, 吴成茂, 等. 基于同态滤波的彩色图像增强[J]. 西安邮电大学学报, 2015, 20(6): 51-55.  
TIAN Xiaoping, CHENG Xin, WU Chengmao, et al. Color image enhancement method based on homomorphic filtering[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2015, 20(6): 51-55.
- [18] 李宏宇, 朱一峰, 黄怡. 基于 Retinex 改进的夜间图像增强算法[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2018, 41(6): 104-108.  
LI Hongyu, ZHU Yifeng, HUANG Yi. Improved night image enhancement algorithm based on Retinex[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 41(6): 104-108.
- [19] 赵春丽, 董静薇. 基于暗通道及多尺度 Retinex 的雾霾天气图像增强算法[J]. 激光杂志, 2018, 39(1): 104-109.  
ZHAO Chunli, DONG Jingwei. Image enhancement algorithm of haze weather based on dark channel and multi-scale Retinex[J]. Laser Journal, 2018, 39(1): 104-109.
- [20] 石磊, 奚茂龙, 孙俊. 基于可控核双边滤波 Retinex 水下图像增强算法[J]. 量子电子学报, 2018, 35(1): 7-12.  
SHI Lei, XI Maolong, SUN Jun. Underwater image enhancement algorithm based on controllable nuclear bilateral filtering Retinex[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2018, 35(1): 7-12.
- [21] 庄文兵, 祁创, 王建, 等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 87-94.  
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, WANG Jian, et al. Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 87-94.
- [22] 龚钢军, 张帅, 吴秋新, 等. 基于 TensorFlow 的高压输电线路异物识别[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 204-209, 216.  
GONG Gangjun, ZHANG Shuai, WU Qiuxin, et al. Foreign body identification based on TensorFlow for high voltage transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 204-209, 216.
- [23] FAN Wen, LIAO Yuan. Wide area measurements based fault detection and location method for transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 53-64. DOI: 10.1186/s41601-019-0121-9.

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-20

作者简介:

秦 钟(1983—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为输电运检、泛在电力物联网等; E-mail: kmm7865@163.com

杨建国(1974—), 男, 大专, 助理工程师, 主要研究方向为电厂电气设备运行与检修;

王海默(1984—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为输电运检、超特高压带电作业等。

(编辑 张爱琴)