

# 基于小波变换与 Retinex 的电路板红外图像增强技术

郝建新

(中国民航大学基础实验中心, 天津 300300)

**摘要:** 电路板红外图像发热芯片区域的增强是红外图像故障检测系统中一项重要研究内容。针对电路板某些芯片的发热量小, 芯片区域红外图像与背景差异弱的特点, 为提高故障检测效率, 设计了一种融合小波变换与改进的多尺度 Retinex 红外图像增强算法。首先, 通过小波变换获得不同频率的子带图像; 然后, 利用多尺度 Retinex 算法对低频子带图像进行增强处理; 对于高频子带图像, 利用可变阈值去噪, 引入图像清晰度参数, 依据参数值对高频图像进行适度增强。最后, 对处理后的高、低频图像进行小波逆变换与重构, 实现电路板红外图像增强。对增强后的红外图像进行的定量以及定性评价表明: 与单一的利用直方图均衡算法、小波变换法以及多尺度 Retinex 增强算法相比, 本文算法改善了某些发热芯片区域红外图像对比度低且细节模糊问题, 抑制了噪声, 提升了电路板红外图像整体视觉效果。

**关键词:** 红外图像; 图像增强; 小波变换; Retinex; 图像清晰度

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2015)12-1036-05

## The Technology about Infrared Image Enhancement of Circuit Board Based on Wavelet Transform and Retinex

HAO Jian-xin

(Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** The chip area image enhancement of the circuit board is an important part of the infrared image fault detection system. Because some chip of circuit board has low calorific value, there is no obvious difference between the chip area infrared image and the background area infrared image. To improve the fault detection efficiency, a new infrared image enhancement method based on the wavelet transform and the improved multi-scale Retinex is designed in this paper. Firstly, the wavelet transform is used to obtain sub-band images of different frequency. Then, for low frequency sub-band image, the multi-scale Retinex is used, and for high frequency sub-band image, the variable threshold is applied to de-noise. At last, for the low and high frequency image, the image reconstruction is taken to achieve image fusion. The experiment results show that the method can suppress noise while preserving edge and detail elements, and enhance visual effect effectively.

**Key words:** infrared image, image enhancement, wavelet transform, Retinex, image sharpness

## 0 引言

电路板红外故障检测系统将正常电路板工作状态下的红外图像与故障电路板工作状态下的红外图像进行比对, 通过发热芯片的温度差异实现故障查找。但是由于红外图像受到大气辐射、发热芯片辐射以及部分芯片发热不明显的影响, 其对比度差、信噪比低、目标形状和结构信息均表现不足。如我们重点

关注的对象为电路板上发热的芯片部分, 但有些发热小的芯片受到背景区域的影响非常大, 甚至与背景相混淆, 这不可避免地增加了直观定位故障点的难度。因此, 要在红外故障监测系统中对红外图像进行必要的预处理以增加对比度提高信噪比, 增强图像的细节, 改善视觉效果, 使得处理后的红外图像更适合人眼观察以及计算机分析和处理。

直方图均衡化法<sup>[1]</sup>、反锐化掩膜法<sup>[2]</sup>是以往最常

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2015-07-27。

作者简介: 郝建新 (1986-), 男, 天津武清人, 硕士研究生, 研究方向为模式识别与智能系统。

基金项目: 国家自然科学基金, 编号: U1333111; 天津市自然基金, 编号: 12JCQNJC00600。

用的红外图像增强算法，但这类算法在增强了对比度的同时，也放大了噪声，并且造成图像信息的丢失。小波变换<sup>[3]</sup>等多分辨率的分析方法在红外图像增强中也有应用，即利用小波变换将红外图像的信号与噪声进行分离，该方法能较好地解决噪声问题。Retinex 理论是一种关于人类视觉光亮度和色彩感知模型<sup>[4]</sup>，是一种基于特征的对比度增强方法，可以有效减少由于光照不均匀所引起的图像降质，对感兴趣的目标进行有效增强，因此也被广泛用于图像增强领域。

针对电路板红外图像的特点，本文设计了一种将小波变换与改进的多尺度 Retinex 算法相结合的电路板红外图像增强算法。经试验表明，本文算法在有效的增强了红外图像同时抑制了噪声的影响。

## 1 算法简介

### 1.1 基于小波变换的图像分解

在小波域中，噪声主要存在于小尺度信号中，且随着分析尺度的不断增大而快速下降；而边缘细节部分，随着分析尺度的增大其下降速度比噪声慢<sup>[5]</sup>。因此，采用多尺度多分辨率小波变换，提取电路板红外图像多个维度上的小波系数，低频小波系数表征图像的轮廓信息，而图像不同维度上的细节、边缘以及噪声等信息则由其余的高频小波系数表征。

本文利用小波变换将图像分解成 4 个子带图像<sup>[6]</sup>，水平与垂直方向皆为低频成分的 LL；水平方向低频、垂直方向高频成分的 LH；水平方向高频、垂直方向低频成分的 HL；水平与垂直方向均为高频的 HH。如图 1 所示。

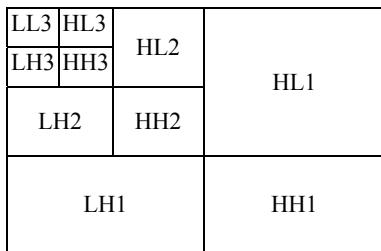


图 1 三级小波分解示意图

Fig.1 Three wavelet decomposition schematic

对分解图像进行分析可以得出以下结论，图像的能量信息包含在低频成分中，细节信息包含在高频成分中。依据该结论，在本文后续算法中，根据不同频率范围内的图像分量特点，有针对性的采用不同的方法进行图像增强，突出细节部分对比度的同时有效抑制了噪声的干扰，改善了图像质量。

### 1.2 多尺度 Retinex 图像增强

Retinex 最早由 Land 提出，也可称之为视网膜皮层理论，该理论是在色彩恒常性基础上提出的一种图

像增强方法。解释了人眼在不同亮度的环境光条件下，主要与物体的反射光有关，而与照射光无关，光照是否均匀对其色彩无影响，具有恒定性<sup>[7-9]</sup>。

Retinex 作为人眼感知亮度和色度的视觉模型，认为红外图像是目标热辐射和背景热辐射综合作用的结果，对于一副给定的红外图像  $S(x,y)$ ，由描述了背景热辐射强度的环境亮度函数  $L(x,y)$  与体现了物体目标特征的物体反射函数  $R(x,y)$  组成，其数学表达式为：

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

将 Retinex 算法应用于红外图像增强，通过改变亮度图像 和反射图像 在原图像中的比例，可以抛开物体背景辐射强度而仅仅突出目标本身特性的信息，从而达到增强图像的目的。

自 Land 提出 Retinex 算法，先后提出了基于中心环绕的单尺度 Retinex 算法（SSR）和多尺度 Retinex 算法（MSR）<sup>[10]</sup>。对于灰度图像，SSR 算法可以表述为：

$$R'(x,y)=\lg S(x,y)-\lg[F(x,y)*S(x,y)] \quad (2)$$

式中： $R'(x,y)$  为增强后图像； \* 为卷积操作；  $F(x,y)$  为中心环绕函数，一般采用高斯函数，其表达式为：

$$F(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}) \quad (3)$$

对  $R'(x,y)$  进行指数变换即可得到增强后的图像，当  $\sigma$  取较大值时，增强后的图像比较逼真，但局部细节会有所损失；  $\sigma$  取较小值时，图像细节突出，输出颜色容易出现失真。为了保证图像细节与输出颜色之间的平衡，引入了多尺度 Retinex 算法（MSR），其数学表达式为：

$$R'(x,y)=\sum_{i=1}^n\omega_i\{\lg S(x,y)-\lg[F_i(x,y)*S(x,y)]\} \quad (4)$$

式中： $n$  表示环绕函数个数，即尺度的个数，本文取 3；  $\omega_i$  为第  $i$  个尺度的权重因子，且满足  $\sum_{i=1}^n\omega_i=1$ 。

## 2 基于小波与 Retinex 红外图像增强

电路板红外热图像是表征电路板上芯片以及电子元件的发热情况分布，是灰度图像，分辨率低，且对比度低、相关性强、噪声大、视觉效果不明显。根据电路板红外图像特点，本文分 4 步对红外图像进行增强：

- 1) 利用小波变换实现对红外图像进行分解，分别获得高频与低频图像；
- 2) 利用改进的多尺度 Retinex 算法，获得低频子带增强图像；

3) 利用自适应阈值法对高频小波系数进行去噪处理, 以图像清晰度参数作为参考, 计算相应像素点的增强系数, 获得高频增强图像;

4) 重构低频与高频图像, 获得增强图像。

算法流程图如图2所示。

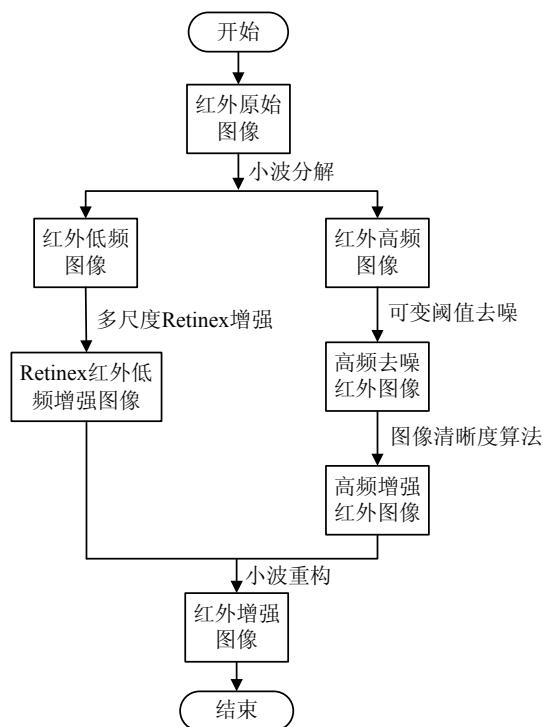


图2 增强算法流程图

Fig.2 Flow chart of enhancement algorithm

## 2.1 低频红外图像增强

Retinex 依据人眼在不同亮度情况下仍可以辨认物体本来颜色的色感一致性能力, 在处理彩色图像时, 它分别对每个颜色通道进行处理与再合成。而对于红外图像, 可以理解为该图像只有一个颜色通道, 色彩一致性体现的是在不同亮度情况下分辨物体灰度级的能力。

经小波变换得到电路板红外图像低频信息, 其低频子带系数  $I(i,j)$  有正有负, 而 Retinex 是按照单通道灰度图像来处理红外图像的, 因此按照式(5), 将系数范围映射到 0~255 之间:

$$I'(i,j) = \frac{I(i,j) - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \times 255 \quad (5)$$

式中:  $I_{\min}$ 、 $I_{\max}$  分别代表子带系数的最小值与最大值;  $I'(i,j)$  为映射后的子带系数。将  $I'(i,j)$  作为输入图像, 按照式(4)进行多尺度增强。实验表明, 按照上述方法增强后的低频子带图像灰暗且运算时间过长, 无法实现最佳视觉效果与实时处理。因此, 在 MSR 基础上引入离散余弦变换, 对 MSR 算法进行如下改进:

步骤一: 分别在 30、80、150、300 四种不同的

尺度因子下计算中心环绕函数  $F(x,y)$ 。

步骤二: 对输入图像  $I'(x,y)$  以及中心环绕函数  $F(x,y)$  按照式(6)、式(7)进行离散余弦变换:

$$H(x,y) = D(I'(x,y)) \times D(F(x,y)) \quad (6)$$

$$R'(x,y) = \sum_{j=1}^n \omega_j \{\lg I'(x,y) - \lg(H(x,y))\} \quad (7)$$

式中:  $D$  表示进行离散余弦变换;  $R'(x,y)$  表示进行离散余弦变换后得到的输出图像。

步骤三: 按照式(8)对输出图像  $R'(x,y)$  进行自动截断拉伸:

$$R'_{\text{out}}(i,j) = \begin{cases} 0 & R'(i,j) < R'_{\min}' \\ \frac{R'(i,j) - R'_{\min}'}{R'_{\max}' - R'_{\min}'} & R'_{\min}' < R'(i,j) < R'_{\max}' \\ 1 & R'(i,j) > R'_{\max}' \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $R'_{\text{out}}(i,j)$  为截断拉伸后的输出值, 截取点的上限  $R'_{\max}'$  与下限  $R'_{\min}'$  由图像的均值 avg 与标准差  $S_d$  来确定, 其中:

$$R'_{\max}' = \text{avg} + d \times S_d \quad (9)$$

$$R'_{\min}' = \text{avg} - d \times S_d \quad (10)$$

式中:  $d$  取值为 1.5~3。

步骤四: 将  $R'_{\text{out}}(i,j)$  按照式(5)反向映射回  $(I_{\min}, I_{\max})$  范围内, 用于进行后续的图像重构。

## 2.2 高频红外图像增强

在对红外高频图像进行增强之前, 首先要对其进行去噪处理。目前常用的去噪方法为硬阈值去噪与软阈值去噪。但是, 硬阈值去噪因采用非连续函数, 易使图像出现局部黑点; 软阈值去噪采用连续函数, 但压缩了高频细节的系数值。为克服软硬阈值去噪的缺点, 本文采用可变阈值方法对高频图像进行去噪处理。假设图像大小为  $M \times N$ , 按照式(11)、式(12)进行通用阈值定义:

$$\lambda_l = \frac{\sigma \sqrt{2 \ln(M \times N)}}{\ln(l+1)} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{\text{median}(|\text{HH}_1|)}{0.6745} \quad (12)$$

式中:  $\sigma$  为噪声信号标准方差;  $l$  为分解尺度, 随着尺度的不断变换, 阈值大小随着变换, 克服了通用阈值全局不变的缺点;  $\text{HH}_1$  为小波分解第一层的对角线高频系数;  $\text{median}()$  为中值函数。

根据自适应软阈值定义规则, 对  $l$  尺度  $k$  方向子带中变换系数按照下式进行去噪处理:

$$f_{l,k}(i,j) = \text{sgn}(f_{l,k}(i,j)) \cdot \max(|f_{l,k}(i,j)| - \lambda_{l,k}(i,j), 0) \quad (13)$$

利用全局增强算法对去噪后的高频图像进行增强时，容易导致某些清晰像素被过度增强，出现振铃或者伪影。本文引入图像的清晰度参数对图像增强系数进行调节，使之与局部图像特征相适应。图像清晰度可以由局部梯度矩阵奇异值得到，假设  $f(x,y)$  表示一副图像， $g(x_i,y_i)$  处像素的局部清晰度  $Q$  定义为：

$$Q = s_1 \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} \quad (14)$$

式中： $s_1$  与  $s_2$  分别为局部梯度矩阵的奇异值。局部图像越模糊，则该处的奇异值  $Q$  越小。显然，清晰的像素点不需要增强，对于不清晰的像素，以清晰度值作为依据进行适度的增强。本文依据式(14)进行增强系数选择，当  $Q \geq 0$  时：

$$E = \begin{cases} E_Q \frac{T_2 - Q}{T_2 - T_1}, & T_1 \leq Q \leq T_2 \\ E_Q, & Q < T_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $Q$  为图像像素的清晰度； $T_1$  和  $T_2$  为增强阈值，分别取 100 和 150； $E_Q$  为与增强系数相关的常数，取 0.6。对高频图像利用下式进行图像增强：

$$f'(i,j) = (1+E) \times f(i,j) \quad (16)$$

式中： $f'(i,j)$  表示高频图像中  $(i,j)$  位置增强后的系数； $f(i,j)$  表示降噪后的图像系数。

### 3 实验结果及分析

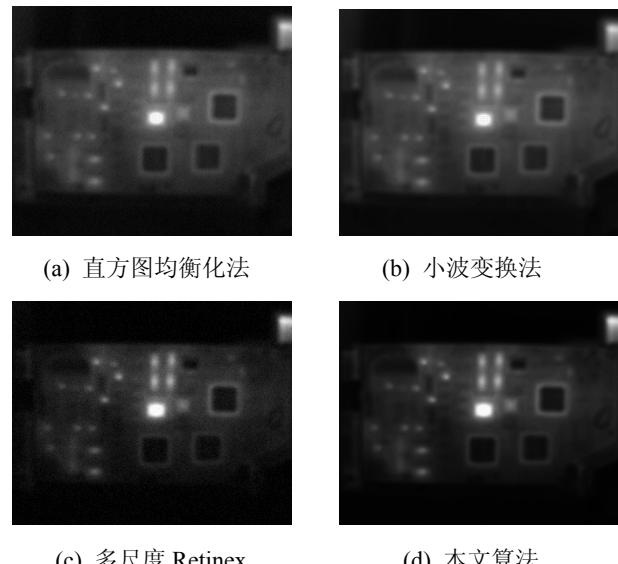
在 Matlab R2009a 环境下，利用直方图均衡法、小波变换法、多尺度 Retinex 法以及本文算法分别对图 3 所示机载气象雷达电路板红外原始图像进行增强处理，增强效果对比图如图 4(a)~图 4(d) 所示。

利用图像评价中的 2 个重要指标：峰值信噪比与图像对比度，对图像处理结果进行定量评价。评价结果如表 1 所示。



图 3 电路板红外原始图像

Fig.3 PCB original infrared image



(a) 直方图均衡化法

(b) 小波变换法

(c) 多尺度 Retinex

(d) 本文算法

图 4 基于不同算法图像增强效果对比图

Fig.4 Infrared image enhancement based on different algorithms

表 1 实验板卡 B 增强指标分析

	直方图 均衡法	多尺度 Retinex	小波变 换法	本文 算法
对比度	0.3047	0.2327	0.1021	0.2164
峰值信噪比	6.7346	5.9758	10.0134	9.7141

综合红外图像增强效果图与定量评价指标的对比可以发现，直方图均衡法与多尺度 Retinex 算法都增加了图像的对比度，但是不论是直观的增强效果图还是定量指标分析，上述算法增强了图像对比度的同时也放大了噪声，如图 4(a)、图 4(c) 所示。

如表 1 所示，小波变换法在 4 种增强算法中峰值信噪比最高，对噪声的抑制效果最好。但是，其增强效果不理想，对比度也较低。本文利用小波变换与多尺度 Retinex 相结合方法处理红外图像，如图 4(d) 所示，调节了红外图像亮度的同时，将淹没在阴影区域的细节表现得更清楚，整体视觉效果比较理想；在指标定量分析方面，不论是对比度还是峰值信噪比都取得了比较满意的结果，这也表明本文方法在增强图像的同时很好地抑制了噪声，较好地改善了图像的增强效果。

### 4 结论

1) 利用小波变换分解红外图像，有效地将图像边缘细节与噪声部分进行分离，对高频和低频图像有针对性地设计相应算法，分别实现图像增强处理。将本文算法应用于红外故障检测系统中，可以更容易利用人眼直接判断芯片的发热红外图像，定位故障点所在，具有一定的实用价值。

2) 在低频部分, 利用人眼的色感一致性能力对低频部分图像进行增强, 增强和图像视觉效果良好; 高频部分, 可变阈值可以较好地去除图像噪声, 图像清晰度参数的应用有针对性地对高频图像进行不同程度的增强处理。

3) 通过表1可知, 直方图均衡法与多尺度 Retinex 法在增强了对比度的同时也放大了噪声; 小波变换法虽然对噪声产生了较好地抑制, 但是没有有效地增强图像对比度; 本文算法中, 对比度虽然低于直方图均衡法, 但是其信噪比较高, 视觉效果明显高于直方图均衡法。同时, 本文算法在去噪方面只略低于小波变换增强算法, 比单独使用多尺度 Retinex 算法增强效果更好。

综上所述, 本文算法在一定程度改善了图像的对比度增强视觉效果, 同时也有效地对噪声进行了抑制, 综合效果优于另外3种方法, 可以应用于电路板红外图像故障检测系统中。

## 参考文献:

- [1] 贾兆辉, 伊兴国, 孔鹏, 等. 一种基于直方图的自适应红外图像增强算法[J]. 红外技术, 2014, 36(9): 719-722.  
JIA Zhao-hui, YI Xing-guo, Kong peng, et al. A self-adaptive enhancement algorithm for infrared images based on histogram[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(9): 719-722.
- [2] 赵晓雷, 姚新宇. 基于小波变换的反锐化掩模图像增强研究[J]. 渭南师范学院学报: 综合版, 2013, 28(6): 60-62.  
ZHAO Xiao-lei, YAO Xin-yu. Research on unsharp masking image enhancement based on wavelet transformation[J]. *Journal of Weinan Normal University*, 2013, 28(6): 60-62.
- [3] 尹士畅, 喻松林. 基于小波变换和直方图均衡的红外图像增强[J]. 激光与红外, 2013, 43(2): 225-228.  
YIN shi-chang, YU Song-lin. Infrared image enhancement algorithm based on wavelet transform and histogram equalization[J]. *LASER & INFRARED*, 2013, 43(2): 225-228.
- [4] 刘瑞剑, 陈树越, 张甲杰. 多尺度 Retinex 算法在红外图像增强中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(4): 193-195.  
LIU Rui-jian, CHEN shu-yue, ZHANG Jia-jie. The application of enhanced technology of infrared image based on Retintex[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008, 28(4): 193-195.
- [5] 张新明, 沈兰荪. 基于小波和统计特性的自适应图像增强[J]. 信号处理, 2001, 17(3): 227-231.  
ZHANG xin-ming, SHEN lan-sun. Adaptive image enhancement based on Wavelet and statistical properties[J]. *SIGNAL PROCESSING*, 2001, 17(3): 227-231.
- [6] 宋庆峰, 吕绪良, 隋明序, 等. 一种基于小波变换的图像增强方法[J]. 光电技术应用, 2014, 29(6): 39-42.  
SONG Qing-feng, LV Xu-liang, SUI Ming-xu, et al. Image enhancement method based on wavelet transform[J]. *ELECTRO-POTIC TECHNOLOGY APPLICATION*, 2014, 29(6): 39-42.
- [7] JH J, Y B, JB R. Contrast-enhanced fusion of multi-sensor images using subband-decomposed multiscale retinex[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2012, 21(8): 3479-3490.
- [8] 张凯, 金伟其, 裴溯, 等. 水下彩色图像的亮度通道多尺度 Retinex 增强算法[J]. 红外技术, 2011, 33(11): 630-634.  
ZHAGN Kai, JIN Wei-qi, QIU su, et al. Multi-scale Retinex enhancement algorithm on luminance channel of color underwater image[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(11): 630-634.
- [9] 刘海波, 汤群芳, 杨杰. 改进直方图均衡和 Retinex 算法在灰度图像增强中的应用[J]. 量子电子学报, 2014, 31(5): 525-532.  
LIU Hai-bo, Tang Qun-fang, YANG Jie. Application of improved histogram equalization and Retinex algorithm in gray image enhancement[J]. *CHINESE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, 2014, 31(5): 525-532.
- [10] 李秋妮, 晁爱农, 史德琴, 等. 一种新的小波半软阈值图像去噪方法[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(8): 1566-1570.  
LI Qiu-ni, CHAO Ai-nong, SHI De-qin, et al. A novel image denoising method of wavelet semi-soft threshold[J]. *Computer Engineering & Science*, 2014, 36(8): 1566-1570.