

基于照射\_反射模型和有界运算的多谱段图像增强

毕国玲 续志军 赵建 孙强

Multispectral image enhancement based on irradiation-reflection model and bounded operation

Bi Guo-Ling Xu Zhi-Jun Zhao Jian Sun Qiang

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 100701 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.100701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.100701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于复振幅场信息复用和 RSA 算法的非对称多幅图像认证方法

[Asymmetric multiple-image authentication based on complex amplitude formation multiplexing and RSA algorithm](#)

物理学报.2015, 64(11): 110701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.110701>

一种基于抖动和混沌技术的数字图像篡改检测及修复算法

[A novel image authentication and recovery algorithm based on dither and chaos](#)

物理学报.2014, 63(21): 210701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.210701>

一种基于混沌和汉明码的数字图像篡改检测及修复算法

[A novel image authentication and recovery algorithm based on chaos and Hamming code](#)

物理学报.2014, 63(2): 020701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.020701>

基于双阈值 Huber 范数估计的图像正则化超分辨率算法

[A regularized super resolution algorithm based on the double threshold Huber norm estimation](#)

物理学报.2013, 62(20): 200701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.200701>

高分辨率合成孔径雷达图像的 Gamma 分布下最大后验概率降斑算法

[Gamma-distributed maximum a posteriori despeckling algorithm of high-resolution synthetic aperture radar images](#)

物理学报.2013, 62(18): 180701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.180701>

# 基于照射\_反射模型和有界运算的多波段 图像增强\*

毕国玲<sup>1)2)†</sup> 续志军<sup>1)</sup> 赵建<sup>1)</sup> 孙强<sup>1)</sup>

1)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年11月17日收到; 2014年12月24日收到修改稿)

根据多尺度照射\_反射模型, 结合广义有界运算模型和引导滤波, 能够有效地解决多波段降质图像的增强问题. 算法采用自适应的引导滤波核函数作为环绕函数, 估计反映图像整体结构的不同尺度的低频照射分量; 利用有界广义对数比 (general log-radio, GLR) 模型加法代替 Retinex 理论中的对数变换运算; 再由 GLR 模型减法去除照射分量, 将不同尺度的反射分量从原始图像中分割出来; 对不同尺度反射分量的有效信息采用有界 GLR 模型乘法和加法进行融合, 有效地避免光晕伪影现象及越界现象的发生, 得到多尺度反射分量图像, 即最终的增强图像. 通过对可见光波段的低照度图像和雾霾图像、红外图像、X 光医学图像四组多波段降质图像实验分析, 以对比度和信息熵作为评价指标, 与同类算法进行了图像增强效果的定性和定量对比, 结果表明本文算法增强后的图像纹理和边缘细节更加丰富、对比度更高、视觉效果更佳, 可广泛地应用于多种图像增强领域.

**关键词:** 图像增强, 照射\_反射模型, 有界运算, 引导滤波

**PACS:** 07.05.Pj, 42.79.Ls, 87.63.lm, 95.75.Mn

**DOI:** 10.7498/aps.64.100701

## 1 引言

随着科学技术的发展, 各波段的成像技术在工业监测、军事侦查、医疗诊断、航空航天等领域都得到了广泛的应用. 但在实际工程中, 由于受外界环境或波段自身性质的限制, 如可见光波段易受天气、能见度、光线等因素影响, 红外波段成像受红外传感器本身固有特性及外界大气环境因素干扰, X 光成像系统受 X 光散射、光量子噪声等各种不利因素影响, 导致降质图像的存在, 严重影响其后期的图像观察及分析. 因此, 突出图像的有用信息, 改善图像的视觉效果是亟待解决的问题.

传统的图像增强方法包括空域法和频域法, 如直方图均衡 (histogram equalization, HE)、灰度变换、Retinex 算法、小波变换<sup>[1]</sup>、同态滤波、梯度

域变换等<sup>[2]</sup>. 还有基于物理模型的图像增强方法, 如采用大气衰减模型或光照反射模型. Tan<sup>[3]</sup> 利用最大化复原图像对比度来增强图像; He 等<sup>[4]</sup> 根据暗原色原理, 提高雾天图像的清晰度, 取得了良好的视觉效果. 还有其他一些增强方法<sup>[5,6]</sup>, 其中 Retinex 模型<sup>[7]</sup> 是 Land 基于颜色恒常知觉的计算机理论提出的照射\_反射模型. 此后出现的改进算法如随机路径算法、同态滤波算法、泊松方程算法等, 其中广泛研究的中心环绕 Retinex 方法<sup>[8]</sup> 包括单尺度 Retinex 算法、多尺度 Retinex 算法、可变框架的算法等. 多尺度 Retinex 能有效改善高动态范围图像的视觉效果, 但在图像明暗对比强烈区域易有光晕伪影现象. 为此, 在估计光照分量时采用 meanshift 滤波方法<sup>[9]</sup>、自适应滤波方法<sup>[10]</sup>、改进各向异性扩散方法<sup>[11]</sup>, 都有效地去除了高对比度

\* 国家自然科学基金 (批准号: 60977001) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: bigl\_ciom@163.com

区域的噪声和消除光晕伪影现象. 文献[12]提出一种基于平稳小波变换和多尺度 Retinex 的红外图像增强方法, 改善了图像的整体视觉效果. 文献[13]指出, 传统的数字图像处理过程中, 直接利用传统运算对图像灰度进行操作, 可能有超出图像灰度范围的运算过程, 这样就会导致在图像处理过程中大量图像细节信息的丢失, 因此提出了一种对数图像处理模型 LIP(logarithmic image processing), 重新定义加、减、乘、除等传统运算规则, 能在指定的区间内对图像灰度进行处理, 避免传统运算的越界问题. 文献[14, 15]利用参数化的对数图像处理模型(parameter logarithmic image processing, PLIP), 在图像增强中得到了较好的视觉效果. 文献[16—19]提出根据图像噪声及掩膜性质等实际要求, 重新定义和设计一些广义的加、减、乘等线性运算模型, 能在有界范围内处理图像的灰度, 图像处理过程中不会产生超出界限的值, 很好地保持了图像的细节信息.

本文提出了一种多尺度照射\_反射模型, 结合有界运算和引导滤波算法, 能够有效地处理多谱段降质图像的增强问题. 采用不同尺度的引导滤波核函数作为低通滤波算子, 估计反映图像整体结构的低频照射分量; 根据有界 GLR 模型中的加法代替 Retinex 算法中的对数运算; 再由 GLR 模型的减法去除照射分量, 将不同尺度的反射分量从原始图像中分割出来; 利用梯度图像得到自适应增益函数, 对不同尺度反射分量的有效信息采用有界 GLR 模型乘法和加法进行融合, 得到最终的多尺度反射分量图像, 即最终的增强图像. 实验结果表明, 本算法采用了引导滤波和有界的 GLR 模型, 避免了光晕伪影现象和运算越界的问题, 实现了可见光低照度图像和雾霾图像、红外图像、X 光医学图像等多谱段降质图像纹理细节的增强和对比度及清晰度的提高, 具有较强的抗噪声能力, 可广泛地应用于多种图像增强领域.

## 2 基本理论

### 2.1 多尺度照射\_反射模型算法及局限性

由 Retinex 理论提出的照射\_反射模型中, 照射分量反映图像的低频部分, 反射分量反映图像的高频细节, 决定着图像的本质特征. 一幅图像  $I(x, y)$  可用反射分量  $R(x, y)$  和照射分量  $L(x, y)$  的乘积表示, 并在对数域中将从原始图像中的照射分

量去除, 便可得到反映物体本质属性的反射分量. 而照射分量的计算, 在数学上是一个奇异问题, 没有统一的数学模型求解, 只能通过近似估计来获取. 因此, 多尺度照射\_反射模型算法, 即多尺度 Retinex (multi-scale Retinex, MSR) 算法通用模型可用 (1) 式表示:

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i \{ \log I(x, y) - \log [I(x, y) * G(x, y)] \}, \quad (1)$$

其中, 环绕函数  $G(x, y)$  为低通函数, 用于模拟原始图像中变换缓慢的信号, 即可从原始图像中估计出照射分量  $L(x, y)$ .  $G(x, y)$  一般采用具有较强动态压缩能力的函数形式, 传统上采用高斯函数.

经 MSR 算法增强的图像整体对比度能得到提高, 然而在明暗对比度强烈的部分易出现光晕伪影现象. 此现象的出现主要是由传统的 Retinex 算法认为空间照度是缓慢变化与实际场景的成像亮度突变情况不符造成的. MSR 是利用高斯卷积模板进行照射分量估计, 而高斯滤波是一种各向同性的滤波过程, 只考虑到像素间的距离, 它在滤波时虽然对边缘进行了平滑, 但不具备边缘保留能力, 导致像素值变化剧烈的边缘区域模拟全局照度分布失败, 会产生光晕伪影现象. 可见在估计照射分量时, 如果能具有保持阶跃信号的不变性, 将会有效地避免光晕伪影现象的产生, 为此本文采用引导滤波核函数进行照射分量的估计.

### 2.2 引导滤波算法

引导滤波是一种新型局部线性滤波, 它是一个线性移不变的滤波过程, 将输入图像  $P$ , 引导图像  $I$ , 输出图像为  $Q$ , 那么存在以下关系:

$$Q_i = \sum_j W_{ij}(I)P_j. \quad (2)$$

可知, 由于引导与输出图像存在线性关系, 那么有  $\nabla Q = a_k \nabla I$ , 可见输出图像  $Q$  具有与引导图像  $I$  相同的边缘梯度特性. 经推导, 引导滤波核函数  $W_{ij}$  如 (4) 式所示,  $i$  和  $j$  为像素的位置:

$$W_{ij} = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left[ 1 + \frac{(P_i - \mu_k)(P_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right], \quad (3)$$

其中  $|\omega|$  为窗口  $\omega_k$  的像素个数,  $\varepsilon$  为平滑因子,  $\mu_k$  和  $\sigma_k$  为窗口  $\omega_k$  中的像素均值和均方差,  $\sum W_{ij}(P) = 1$ , 不需要对滤波核函数权重进行

归一化处理. 与传统高斯滤波核函数相比, 引导滤波核函数利用平滑窗口内的像素均值和方差进行局部估计, 具有良好的边缘保持和细节增强的特性.

选取一维信号进行引导滤波并分析, 图 1 中实线代表原始输入信号, 虚线表示输入信号与滤波后的差值信号. 可见, 差值信号波动较小, 说明引导滤波能很好跟随和保持原始信号的梯度. 结果表明, 采用引导滤波核函数作为照射\_反射模型中的环绕函数进行低频照射分量的估计, 将会有效地避免光晕伪影现象的发生. 以上选取参数  $\varepsilon = 0.01^2$ ,  $r = 3$ .

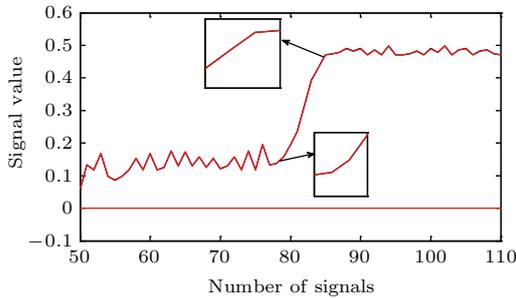


图 1 一维信号的引导滤波

Fig. 1. Guide filter for one-dimensional signal.

### 2.3 广义有界运算模型

传统多尺度的 Retinex 算法对不同尺度的参数采用线性加权平均, 这种折中的融合策略不能很好地反映多尺度的优势, 为此本文将广义有界运算(即广义对数比模型)引入到多尺度的 Retinex 理论中.

有界运算 GLR 模型是一个定义域和值域都为  $(0, 1)$  的运算模型, 对图像灰度值  $I(i, j)$  进行归一化处理, 定义如下:

$$I'(i, j) = (I(i, j) + 1 + \delta)/(M + \delta'), \quad (4)$$

式中  $M$  为光强饱和值, 对于 8 位灰度图像,  $M = 256$ ;  $\delta$  与  $\delta'$  是微小的扰动量. 对归一化后像素值  $x = I'(i, j) \in (0, 1)$  进行非线性变换, 记  $p(x) = \frac{1-x}{x}$ , 对其取对数变换可得非线性函数  $\phi(x)$  如 (5) 式, 其对相应的逆变换  $\phi^{-1}(x)$  如 (6) 式所示:

$$\phi(x) = \log[p(x)] = \log\left(\frac{1-x}{x}\right), \quad (5)$$

$$\phi^{-1}(x) = \frac{1}{e^x + 1}. \quad (6)$$

分别采用  $\oplus$ ,  $\ominus$ ,  $\otimes$  表示 GLR 模型中的加、减、乘的广义线性运算, 定义如下:

$$x_1 \oplus x_2 = \varphi^{-1}[\varphi(x_1) + \varphi(x_2)] = \frac{1}{p(x_1)p(x_2) + 1}, \quad (7)$$

$$\gamma \otimes x = \varphi^{-1}[\gamma\varphi(x)] = \frac{1}{p(x)^\gamma + 1}, \quad (8)$$

$$x_1 \ominus x_2 = \varphi^{-1}[\varphi(x_1) - \varphi(x_2)] = \frac{1}{p(x_1)p(x_2)^{-1} + 1}. \quad (9)$$

这里,  $x_1, x_2$  表示两路图像输入信号,  $\gamma$  为任意实数. 若  $\xi \oplus x = x$ , 可推导得 GLR 模型的零值为  $\xi = 1/2$ . GLR 模型为有界运算具有封闭性, 能保证图像的灰度值不会有越界的现象发生. 下文中我们将 GLR 模型中相应的线性运算性质应用到多尺度的照射\_反射模型算法中, 取得了较好的图像增强效果.

## 3 基于照射\_反射模型的算法实现

### 3.1 不同尺度照射分量估计

本文提出的基于照射\_反射模型结合有界运算的多波段图像增强算法的结构框图如图 2 所示. 由引导滤波获取照射分量, 引导滤波的局部平滑窗口半径  $r$  取值较大时, 引导图像会在更大的范围内进行平均线性输出, 使得图像的边缘和细节更加丰富, 过度更加平滑, 避免了块效应和光晕伪影现象的发生; 但是  $r$  取值较小, 会导致锐化作用减弱, 使图像模糊. 可见, 单尺度已经无法满足对细节丰富的照射分量的估计需求, 因此采用多尺度的引导滤波获取不同尺度的照射图像, 使图像的尺寸结构和细节得以充分体现.

本文采用三个不同的尺度因子, 为了对  $r$  的取值具有自适应性, 通过大量的试验, 考虑到引导滤波利用盒式滤波, 设图像的高度和宽度分别为 height 和 width,  $r$  的最大值  $r_{\max} = [\min(\text{height}, \text{width})/2 - 1]$ ,  $r$  的最小值  $r_{\min} = [\min(\text{height}, \text{width})/(2^n)]$ . 其中  $n$  为选取尺度的个数, 令  $n = 3$ ; 取  $r$  的中间值  $r_{\text{mid}} = [(r_{\max} + r_{\min})/2]$ ,  $[\ ]$  表示取整操作. 经小、中、大不同尺度的引导滤波进行处理后如图 3 所示, 小尺度引导滤波获取照射分量图像 [图 3(a)] 反映的是图像的大体结构, 尺度越大获取的照射分量图像细节越清晰 [图 3(b) 和 (c)].

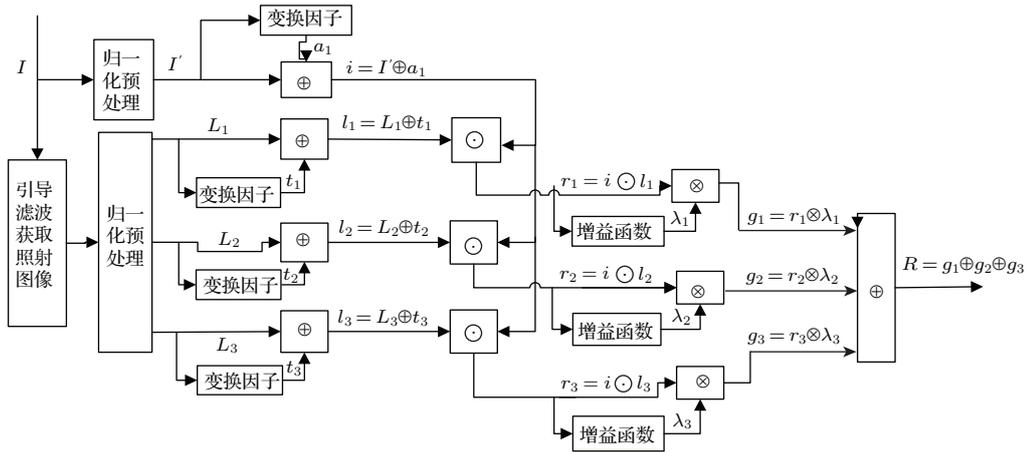


图2 算法结构框图

Fig. 2. Block diagram of the algorithm.



图3 不同尺度的照射分量估计图像 (a) 小尺度; (b) 中尺度; (c) 大尺度

Fig. 3. Estimate radiation images with different dimensions: (a) small-scale; (b) meso-scale; (c) large-scale.

### 3.2 图像的类对数变换

Retinex 模型将运算转换到适合人类视觉感知亮度能力的对数域, 由对数函数的特性 (如图 4) 可知, 该非线性调节有效地压缩了图像的动态范围, 提高图像的整体对比度. 特别是对暗区域的动态范围进行有效扩展, 使得暗区域的细节得以重现; 但是由于高亮区对数变换的曲线斜率过小, 使得高亮区动态范围过度压缩, 致细节丢失. 为此, 这里引入 GLR 有界运算模型, 首先对图像进行预处理, 将原灰度图像像素值的定义域由  $I(x, y) \in [0, 255]$  微扰动对数变换后进行归一化处理 [如 (10) 式], 转换到  $I'(x, y) \in (0, 1)$  的区间内.

$$I'(x, y) = \frac{\log[I(x, y) + 1 + \delta]}{\log(256 + \delta)}. \quad (10)$$

GLR 模型加法性质如图 4 所示, 当  $a > 0.5$  时, 该运算有效地调节了图像动态范围, 对亮区进行了压缩, 对暗区灰度进行了拉伸. 可见, 该部分运算与对数变换具有相似的图像处理能力, 因此称为对图像的类对数变换. 本文选取  $y = x \oplus 0.8$  对图像进行类对数变换, 此时 GLR 模型加法亮区的曲线斜率大于对数变换, 减少亮区细节信息的丢失; 而

在暗区曲线斜率接近对数变换, 保留了暗区图像对比度提高的特性. 对原图像和多尺度引导滤波后的图像进行类对数变换代替传统 Retinex 的对数变换, 分别得到  $i(x, y)$  和照射分量  $l'_i(x, y)$ .

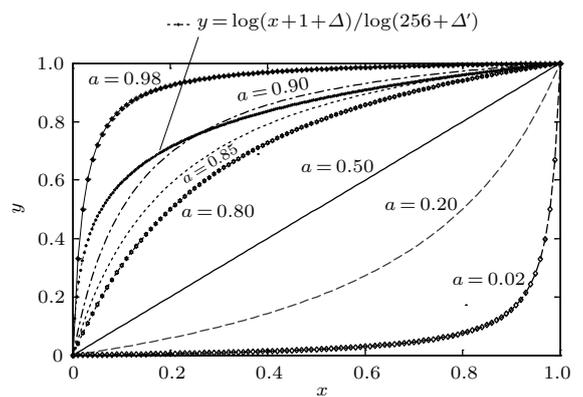


图4 对数变换及 GLR 模型加法

Fig. 4. Logarithmic transformation and GLR model additions.

### 3.3 不同尺度反射分量的获取

由 GLR 模型减法去除照射分量  $l'_i(x, y)$ , 将不同尺度图像的反射分量  $r_i(x, y)$  从原始图像中分割出来, 如 (11) 式:

$$r_i(x, y) = i(x, y) \odot l'_i(x, y). \quad (11)$$

GLR 模型的减法运算特性如图 5. 以大尺度的反射分量图像为例进行说明, 分别选取 GLR 模型减法和传统减法获取的反射图像的第 50 行像素作为一维信号, 在图 6 中分别用实线和虚线表示. 两条曲线都围绕着各自的零点变化 (GLR 模型零点为 0.5, 传统减法零点为 0). 经分析, 当  $x$  与  $a$  越接近时, GLR 模型的减法对传统减法中的小差值, 即小细节进行了放大, 从而避免了小细节的丢失; 而当  $x$  与  $a$  相差越大时, GLR 模型的减法对大差值, 即大细节进行了压缩, 避免了过大的差值造成的光晕伪影现象和噪声干扰.

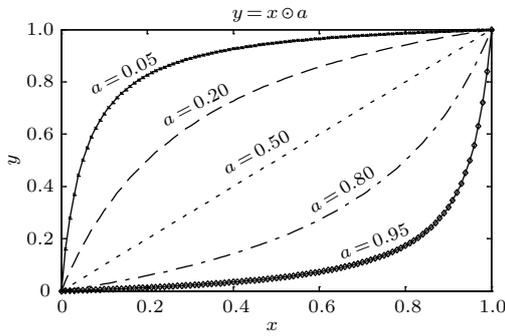


图 5 GLR 模型减法运算

Fig. 5. GLR subtraction.

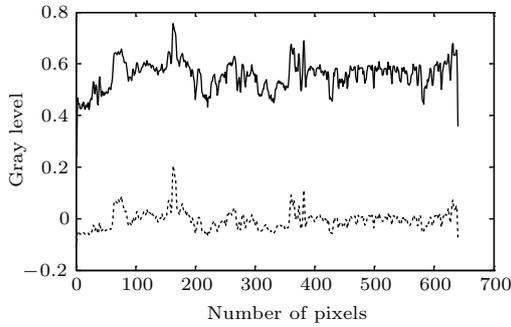


图 6 反射分量图像第 50 行像素信号的一维表示

Fig. 6. One-dimensional signal of the 50th rows of the reflection pixel.

### 3.4 最终增强图像的生成

采用 GLR 模型的乘法和加法与自适应增益函数共同作用 [如 (12) 式所示], 对不同尺度反射分量图像的有效信息进行融合, 得到最终的多尺度反射分量图像, 即最终增强图像.

$$\begin{aligned} & \sum_i^n \lambda_i(x, y) r_i(x, y) \\ &= [\lambda_i(x, y) \otimes r_1(x, y)] \oplus [r_i(x, y) \otimes r_2(x, y)] \cdots \end{aligned}$$

$$\oplus [\lambda_i(x, y) \otimes r_n(x, y)] = \frac{G}{G + \bar{G}}, \quad (12)$$

其中

$$G = \prod_{i=1}^n r_i(x, y)^{\lambda_i(x, y)}, \quad \bar{G} = \prod_{i=1}^n [1 - r_i(x, y)]^{\lambda_i(x, y)},$$

$n$  为尺度参数的总个数,  $r_i(x, y)$  为对应不同尺度下的反射分量,  $\lambda_i(x, y)$  为自适应增益函数.

传统多尺度 Retinex 使每个像素值乘以一个常数增益, 导致图像在平滑区域无法控制噪声的放大, 在高对比度和灰度陡然变换的边缘出现光晕伪影现象. 为此, 本文采用自适应增益函数代替传统常数增益, 对图像不同区域采用不同的增益. 利用人眼对边缘等高频信息比较敏感的特性, 选择具有一定噪声鲁棒性的 Sobel 算子获取边缘梯度图像, 并相对传统 Sobel 算子增加两个对角方向的滤波, 增强了平滑噪声的能力. 图像中每个点的梯度具体公式如下:

水平方向卷积和

$$\begin{aligned} D_0 &= I(i-1, j+1) + I(i+1, j+1) \\ &\quad - I(i-1, j-1) - I(i+1, j-1) \\ &\quad + 2I(i, j) - 2I(i, j-1); \end{aligned} \quad (13)$$

垂直方向卷积和

$$\begin{aligned} D_{90} &= I(i+1, j-1) + I(i+1, j+1) \\ &\quad - I(i-1, j-1) - I(i-1, j+1) \\ &\quad + 2I(i+1, j) - 2I(i-1, j); \end{aligned} \quad (14)$$

45° 方向卷积和

$$\begin{aligned} D_{45} &= I(i-1, j) + I(i, j+1) \\ &\quad - I(i, j-1) - I(i+1, j+1) \\ &\quad + 2I(i-1, j+1) \\ &\quad - 2I(i+1, j-1); \end{aligned} \quad (15)$$

135° 方向卷积和

$$\begin{aligned} D_{135} &= I(i+1, j) + I(i, j+1) \\ &\quad - I(i-1, j) - I(i, j-1) \\ &\quad + 2I(i+1, j+1) \\ &\quad - 2I(i-1, j-1); \end{aligned} \quad (16)$$

最终的梯度图像定义为

$$\begin{aligned} S(i, j) &= [D_0^2(i, j) + D_{45}^2(i, j) + D_{90}^2(i, j) \\ &\quad + D_{135}^2(i, j)]^{1/2}. \end{aligned} \quad (17)$$

由以上得到了丰富的梯度信息图像. 则在像素点  $(x, y)$  处自适应增益函数  $\lambda_i(x, y)$  与  $I_s(x, y)$  存在如下关系:

$$\lambda_i(x, y) = 2^{[2 * I_s(x, y)]} + 2. \quad (18)$$

由(18)式可知, 自适应增益函数  $\lambda_i(x, y)$  的值显然大于1, 采用GRL模型的乘法(如图7), 当  $a > 1$  时, 在GRL模型的零值(即  $x = 0.5$ )附近的像素值被拉伸, 但对远离GRL模型的零值进行了压缩, 传统的乘法显然达不到这样的效果. GRL模型有界的封闭加法运算(如图3)避免了传统加法简单叠加而产生的越界现象, 使得图像的细节更加丰富清晰, 整体图像的对比度得到提高.

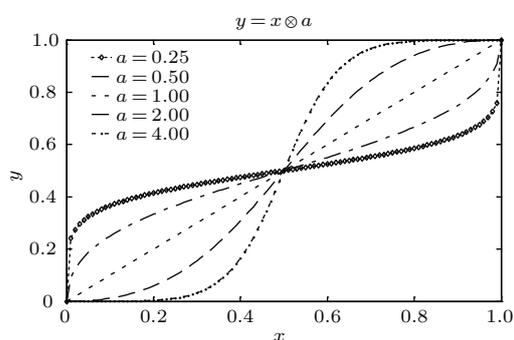


图7 GRL模型乘法运算

Fig. 7. GRL multiplication.

## 4 实验结果与分析

### 4.1 对比实验

实验中选取可见光波段的低照度图像和雾霾图像、红外图像、X光医学图像4组多谱段降质图像

(如图8)进行实验说明, 并与多尺度Retinex算法(MSR)以及传统有效的直方图均衡化(HE)算法、同态滤波算法(homomorphic filtering, HF), 进行图像增强效果的对比和分析.

基于MSR, HE, HF以及本文算法的低对比度的可见光低照度图像、红外图像、X光医学图像增强效果对比, 如图9—11所示. MSR处理的图像都有一定的视觉增强效果, 但是在红外图像处理过程中MSR在高亮区附近出现了光晕伪影现象, 如图10(a)中白色椭圆标记的部分所示; 直方图均衡化算法虽然提到了整体对比度, 但在高亮区出现过饱和现象, 致部分细节丢失, 且放大了噪声, 如图9(b), 图10(b), 图11(b)中黑色椭圆标记的部分所示; 经HF算法增强后的图像, 避免了直方图均衡化产生的过增强现象, 但是整幅图像细节看起来仍然模糊, 视觉效果较差; 本文算法处理的图像整体对比度和清晰度得到了提高, 不仅暗区的细节得到了重现和增强, 还尽量多地获取了高亮区的图像细节信息, 避免了光晕伪影现象的产生, 并且抑制图像整体噪声, 取得了较好的视觉效果.

基于MSR, HE, HF和本文算法的雾霾图像增强效果对比如图12所示. 经MSR算法、直方图均衡以及同态滤波处理后的图像可以看出, 这些算法对近景图像细节信息进行增强, 取得了较好的除雾清晰化效果, 而远景仍模糊不清, 灰度变化缓慢. 这是由于雾天图像的退化程度与景深存在非线性关系, 随着景深的增加其退化愈严重. 本文算法具有较强的去雾能力, 不仅近景去雾效果好, 远景的楼群纹理细节也很清晰, 提高了雾霾天的视觉能见度.

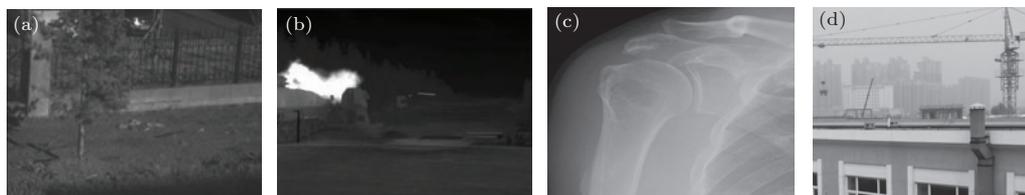


图8 原始图像 (a) 低照度图像; (b) 红外图像; (c) X光医学图像; (d) 雾霾图像

Fig. 8. The original image: (a) low illumination image; (b) infrared image; (c) X-ray medical image; (d) haze image.

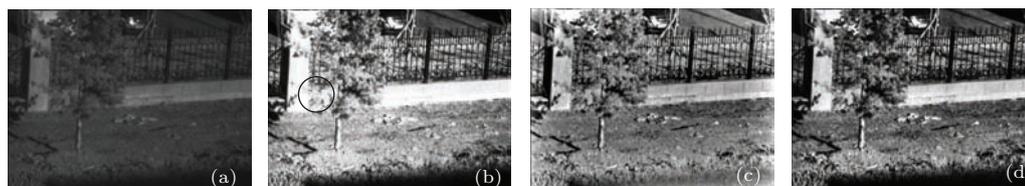


图9 可见光低照度图像增强对比 (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) 本文算法

Fig. 9. Comparison of visible low illumination image enhancement: (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) proposed.



图 10 红外图像增强对比 (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) 本文算法

Fig. 10. Comparison of infrared image enhancement: (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) proposed.



图 11 X 光医学图像增强对比 (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) 本文算法

Fig. 11. Comparison of X-ray medical image enhancement: (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) proposed.

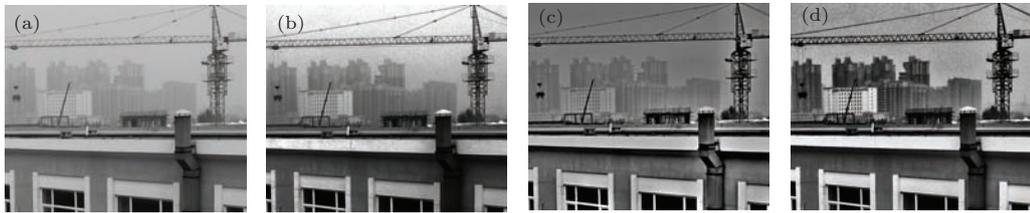


图 12 可见光雾霾图像增强对比 (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) 本文算法

Fig. 12. Comparison of dehazing result: (a) MSR; (b) HE; (c) HF; (d) proposed.

## 4.2 定量对比分析

采用对比度和信息熵两种评价标准, 对以上试验图像的增强效果做定量对比分析, 对比度及信息熵定义分别如 (19) 和 (20) 式所示:

$$C = \left\{ \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [I(i, j) - \mu]^2 \right\}^{1/2}, \quad (19)$$

$$H = - \sum_{x \in L} q(x) \ln q(x). \quad (20)$$

式中,  $M$  和  $N$  分别为图像的长和宽,  $I(i, j)$  为图像的灰度值,  $\mu$  为图像的灰度均值,  $q(x)$  为增强后图像的灰度分布密度. 经实验得知, 当图像细节

很模糊但局部灰度值差别较大时, 经 (19) 式得到的对比度也很高, 为此, 这里采用均值滤波图像  $\mu(i, j)$  (即局部均值) 代替 (19) 式中的全局图像均值  $\mu$ , 取得了较好的对比效果. 取均值滤波半径为  $[\min(M, N)/20]$ , 对于上小节中四组对比试验图像的定量参数描述如表 1 所列, 四种算法增强后的图像对比度和信息熵相对于原图像得到了提高. 本文算法得到的对比度和信息熵这两种指标的大部分值比 MSR、直方图均衡以及同态滤波算法高, 说明本文算法的图像增强效果普遍较好, 获取的图像细节丰富、对比度高.

表 1 图像质量评价参数对比

Table 1. Comparison of image quality evaluation parameters.

Method	Low illumination		Infrared		X-ray		Haze	
	H	C	H	C	H	C	H	C
Original	5.647	0.048	4.038	0.079	3.981	0.056	7.082	0.029
MSR	7.619	0.178	6.475	0.176	3.582	0.112	6.906	0.051
HE	6.155	0.140	5.515	0.168	3.671	0.091	5.849	0.033
HF	6.043	0.126	5.321	0.154	3.049	0.081	6.272	0.027
Proposed	8.017	0.174	7.348	0.187	4.992	0.128	7.824	0.047

## 5 结 论

本文提出了一种基于多尺度照射—反射模型和广义有界运算的图像增强算法,有效地解决了多谱段降质图像的增强问题. 算法采用自适应的引导滤波核函数作为环绕函数估计不同尺度的照射分量; 根据有界GLR模型中的加法代替Retinex算法中的对数运算; 再由GLR模型的减法去除照射分量将不同尺度的反射分量从原始图像中分割出来; 利用梯度图像获取自适应增益函数, 采用有界GLR模型乘法和加法对不同尺度反射分量的有效信息进行融合, 得到多尺度反射分量图像, 即最终的增强图像.

因为引导滤波具有良好的梯度保持特性, 算法采用引导滤波作为环绕函数进行照射分量的估计, 有效地避免了多尺度Retinex算法的光晕伪影现象的发生; 同时整个算法的运算过程采用GLR模型的有界运算, 避免了传统运算的越界现象的发生, 使得图像的大量细节得以保留, 采用自适应增益函数, 避免了平滑区域的噪声放大. 实验结果表明, 本算法改善了可见光低照度图像和雾霾图像、红外图像、X光医学图像等多谱段降质图像的整体视觉效果, 具有一定的噪声鲁棒性和边缘及纹理细节信息的保持特性, 提高了图像的对比度和清晰度. 该研究成果已经在红外热像仪中得到了应用, 取得了较好的效果. 本文提出的算法目前只是对8位灰度图像进行增强, 今后将开展对彩色图像增强的研究.

## 参考文献

- [1] Liu S G, Chen J H, Fan H Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 120305
- [2] Zhao W D, Zhao J, Xu Z J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214204 (in Chinese) [赵文达, 赵建, 续志军 2013 物理学报 **62** 214204]
- [3] Tan R T 2008 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2008 p1
- [4] He K, Sun J, Tang X 2009 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* 2009 p1956
- [5] Yu D, Bao X D 2010 *J. Biomed. Engineer. Res.* **29** 5 (in Chinese) [余岱, 鲍旭东 2010 生物医学工程研究 **29** 5]
- [6] Jia D Y, Ding T H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4058 (in Chinese) [郑东耀, 丁天怀 2005 物理学报 **54** 4058]
- [7] Land E H 1977 *Sci. Am.* **237** 108
- [8] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A 1997 *IEEE Trans. Image Process.* **6** 451
- [9] Xu X, Chen Q, Wang P A, Sun H J, Xia D S 2008 *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics* **20** 1325 (in Chinese) [许欣, 陈强, 王平安, 孙怀江, 夏德深 2008 计算机辅助设计与图形学报 **20** 1325]
- [10] Meylan L 2006 *IEEE Trans. Image Process.* **15** 2820
- [11] Tang L, Zhao C X, Wang H N, Shao W Z 2008 *J. Image and Graphics* **13** 264 (in Chinese) [唐磊, 赵春霞, 王鸿南, 邵文泽 2008 中国图象图形学报 **13** 264]
- [12] Fang S, Yang J R, Cao Y, Wu P F, Rao R Z 2012 *J. Image and Graphics* **17** 748 (in Chinese) [方帅, 杨静荣, 曹洋, 武鹏飞, 饶瑞中 2012 中国图象图形学报 **17** 748]
- [13] Jourlin M, Phinoli J C 1989 *J. Microscopy* **156** 33
- [14] Zhu R F, Jia H G, Wang C, Wei Q, Zhang T Y, Yu L Y 2014 *Optics and Precision Engineering* **22** 1064 (in Chinese) [朱瑞飞, 贾宏光, 王超, 魏群, 张天翼, 虞林瑶 2014 光学精密工程 **22** 1064]
- [15] Wang R G, Zhu J, Yang W T, Fang S, Zhang X T 2010 *Acta Electron. Sin.* **38** 1181 (in Chinese) [汪荣贵, 朱静, 杨万挺, 方帅, 张新彤 2010 电子学报 **38** 1181]
- [16] Deng G, Cahill L W, Tobin G R 1995 *IEEE Trans. Image Process.* **4** 506
- [17] Deng G 2013 *IEEE Trans. Image Process.* **22** 2903
- [18] Nielsen F, Nock R 2009 *IEEE Trans. Inform. Theory* **55** 2882
- [19] Jia H G, Wu Z P, Zhu M C, Xuan M, Liu H 2013 *Optics and Precision Engineering* **21** 3272 (in Chinese) [贾宏光, 吴泽鹏, 朱明超, 宣明, 刘慧 2013 光学精密工程 **21** 3272]

# Multispectral image enhancement based on irradiation-reflection model and bounded operation\*

Bi Guo-Ling<sup>1)2)†</sup> Xu Zhi-Jun<sup>1)</sup> Zhao Jian<sup>1)</sup> Sun Qiang<sup>1)</sup>

1) (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

2) (University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

( Received 17 November 2014; revised manuscript received 24 December 2014 )

## Abstract

According to irradiation-reflection model, by combining the generalized bounded operation model with guide filter, the problem of enhancement for multispectral degraded images with blurred details can be effectively solved and the contrast and low signal-to-noise ratio can be improved. The multi-scale reflection component image, i.e., final enhanced image is obtained through the following procedures: using the adaptive different scales of guide filter function as surround function estimate reaction; separating out the high-low-frequency information; obtaining the different scales Irradiation images which react the overall structure of the image; using the bounded generalized logarithmic ratio (GLR) model addition to replace the Retinex logarithmic transformation; taking a similar logarithmic transformation to the original image to improve the contrast of the image and make the dark area of image details enhanced; again using GLR model subtraction to remove illuminate components from the original image to segment the different scales of the reflection image, thereby avoiding the loss of small details and the big details caused halo effect and noise interference. With four direction Sobel gradient image which reflects the comprehensive edge details of image information the adaptive gain function can be obtained. To avoid the smooth area noise amplification, by using the GLR model multiplication and addition to fuse the effective information of different scales images, the multi-scale reflection image, namely the final enhanced image are obtained. The effective suppression of the emergence of halo effect and computing overflow, which can retain a large number of image details; the comparison of subjective visual effect and the quantitative parameter analysis of the visible low illumination image, haze image, infrared image and X-ray medical images (a total of four groups of multispectral degraded images), the use of the contrast and entropy as evaluation indices, qualitative and quantitative comparison with a variety of image enhancement algorithms, show that the proposed algorithm strengthens and keeps the details of the image texture and edge, realizes the image contrast enhancement and the effective dynamic range compression, has a strong anti-noise ability, and can meet a variety of practical engineering image enhancement needs. The results of the study has been used in the infrared thermal imager, and good results have been achieved. The proposed algorithm is only for 8-bit grayscale image enhancement, and the color image enhancement will be studied in the future.

**Keywords:** image enhancement, irradiation\_reflection model, bounded operation, guide filter

**PACS:** 07.05.Pj, 42.79.Ls, 87.63.lm, 95.75.Mn

**DOI:** [10.7498/aps.64.100701](https://doi.org/10.7498/aps.64.100701)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60977001).

† Corresponding author. E-mail: [bigl\\_ciomp@163.com](mailto:bigl_ciomp@163.com)