

消除光晕和细节增强的多尺度 Retinex 红外图像增强

温海滨, 毕笃彦, 马时平, 何林远

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 针对传统 Retinex 算法处理红外图像存在光晕伪影和细节增强不足的缺点, 本文提出一种消除光晕和细节增强的 Multi-scale Retinex (MSR) 红外图像增强算法。首先, 以局部方差和局部复杂度构造引导滤波的自适应平滑增益, 然后, 采用改进的引导滤波核函数估计照度分量, 在对数域对多尺度 Retinex 数学模型求解, 获取消除光晕和细节保持的多尺度反射分量。最后, 为进一步增强细节和提升亮度, 对反射分量依灰度等级进行自适应增强, 并通过偏移调整和 Gamma 校正改善图像亮度, 得到最终增强图像。实验结果表明, 本文算法相对其它的 Retinex 增强算法, 可有效地消除光晕现象, 突出细节, 可获得视觉效果良好的增强结果。

关键词: 红外图像; 消除光晕; 细节增强; 多尺度 Retinex; 局部信息; 引导滤波

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)02-0149-08

Halo-free and Detail Enhancement Based on Multi-scale Retinex for Infrared Image

WEN Haibin, BI Duyan, MA Shiping, HE Linyuan

(Institute of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at the drawbacks of traditional Retinex for infrared image which suffer from the halo artifacts and the insufficient in detail enhancement, in this article, a multi-scale Retinex algorithm for infrared image which could remove halo and enhance details was proposed. Firstly, an adaptive smoothing gain was constructed by the local variance and the local complexity. Then the kernel function of improved guided filter was used to estimate the illumination component, the multi-scale Retinex mathematical model was solved in logarithmic domain, the multi-scale reflection components with Halo-free and detail-preserving properties were obtained. Finally, in order to enhance the detail and boost the brightness, reflection component was adaptively enhanced based on gray level, meanwhile, image brightness was improved via offset adjustment and Gamma correction, the final enhanced image was gained. The experimental results demonstrate that, compared with other Retinex enhancement algorithms, our method can efficiently reduce halo artifacts, highlight the detail, achieve a 'visually pleasing' enhancement result.

Key words: infrared image, Halo-free, detail enhancement, multi-scale Retinex, local information, guide filter

0 引言

与可见光成像技术相比, 红外热成像技术对烟、雾、霾等物质的穿透能力, 全天候复杂环境的强适应性, 以及在夜间和恶劣天气下强抗干扰性, 使其广泛应用于遥感监测、精确制导、“海防”等军事领域^[1-2]和安防监控, 物体测温^[3]等民用领域。同时, 因为其受目标辐射特性、红外传输特性以及环境因素的影

响, 红外图像存在信噪比低、细节少、对比度不强、视觉效果模糊等缺点, 成为其实际应用的瓶颈。因此提升红外图像的对比度、增强红外图像的边缘、细节等结构信息是红外图像应用时的必要处理过程。

Retinex 算法是基于人类视觉系统 (Human Visual System, HSV) 提出的图像增强方法。Edwin H Land 与 McCann 于 1971 年提出基于人类视觉感知物体颜色和亮度的视觉模型, Retinex 理论认为人类

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2016-01-11.

作者简介: 温海滨 (1990-), 男 (满), 内蒙赤峰人, 硕士研究生, 研究方向是红外图像处理。E-mail: whbimg@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (61372167), 国家自然科学基金 (61379140)。

所感知到的物体表面的颜色主要取决于物体表面的反射性质。在继 E. land 提出基本的 Retinex 理论后,出现了多种形式的 Retinex 算法:如随机路径算法,同态滤波算法,中心环绕 Retinex 算法^[4],变分框架下的 Retinex 算法^[5]。其中,基于中心环绕 Retinex 算法因模型简单,且能实现色彩恒常性与动态范围压缩之间的平衡等优点而被广泛改进和应用。Land 于 1986 年最早提出了中心环绕 (Center/Surround) Retinex 算法,相继地,Jobson 等人提出了单尺度 Retinex 算法和多尺度 Retinex 算法^[6]。基于中心环绕 Retinex 方法通过对照度分量的近似估计替代对 Retinex 数学模型的奇异求解。然而像素亮度表达照度信息和反射本质的双重信息,如何尽可能准确地估计出照度分量,避免照度估计失真,消除反射结果中的光晕伪影现象,是当前很多学者致力解决的重要方向。Michael Elad^[7]提出基于双边滤波的 Retinex 算法,该算法在增强图像细节的同时,可以很好地消除光晕效应的影响,但因双边滤波复杂度与滤波核尺寸成正比关系,光照估计过程中该算法较为耗时。许欣^[8]等提出了一种基于 mean shift 图像平滑的快速光照估计方法,在有效去除光晕现象的同时,降低了时间复杂度,在计算性能和增强效果上表现良好。汪荣贵^[9]等提出基于无限冲激响应 (IIR) 低通滤波进行照度估计,且与遗传算法结合实现算法参数的自适应选取。但涉及参数个数较多。毕国玲^[10]等提出基于照射-反射模型和有界运算的多谱段图像增强,结合广义有界运算模型和引导滤波,通过有界 GLR 模型中的减法,加法,乘法求取多尺度反射分量,并对多个谱段的图像进行增强,可避免传统运算结果中发生的光晕和越界现象,增强图像视觉效果较好。

本文对 Retinex 算法和引导滤波原理深入地剖析,针对传统 Retinex 算法增强红外图像时存在光晕伪影和细节增强不足的问题,利用图像局部信息构造引导滤波中的自适应平滑增益,更加准确地估计 Retinex 模型中的光照分量。对于获取的多尺度细节层,依反射分量强度进行局部自适应增强,并通过偏移调整和 Gamma 校正,得到最终增强图像。实验结果表明,该方法可以有效消除光晕和增强细节,获得较好的图像增强效果。

1 基本理论

1.1 Retinex 基本理论

Retinex 理论在假设全局光照平缓变化的情况

下,认为图像的灰度分布与场景的光照分量和物体的反射分量满足如下方程:

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

式中: $I(x,y)$ 为照度分量所对应的低频信息; $R(x,y)$ 为目标反射率决定的物体本质信息。基于 Retinex 的图像增强方法去除反映空间光照分布的照度信息,突出目标的本质信息,从而实现图像细节的增强。

为更好地模拟人眼对亮度的感知能力,同时简化模型的计算,通常在对数域进行模型求解,基于中心环绕 Retinex 方法,通过对照度分量的近似估计替代对 Retinex 数学模型的奇异求解,利用低通滤波器获得照射分量的估计值,最终从原图像中去除照度影响进而求得物体的反射本质。

单尺度 Retinex 方法对数域模型为:

$$R(x,y)=\lg L(x,y)-\lg[L(x,y)*G(x,y)] \quad (2)$$

式中: * 表示卷积运算; $G(x,y)$ 为对图像照射分量进行估计的低通环绕函数。

多尺度 Retinex 方法数学模型为:

$$R_M(x,y)=\sum_{k=1}^n w_k \left\{ \lg L(x,y)-\lg[L(x,y)*G_k(x,y)] \right\} \quad (3)$$

式中: $R_M(x,y)$ 为多尺度 Retinex 反射分量输出; n 为尺度数; w_k 为第 k 个尺度所对应的权重,且满足 $\sum_{k=1}^n w_k=1$ 。通常对单尺度结果进行线性加权平均,设置 $w_1=w_2=w_3=1/3$ 。

仅利用单尺度 Retinex 方法对图像进行增强不能实现动态范围压缩和细节保持之间的平衡,多尺度 Retinex (MSR) 能改善这一问题。故应利用多尺度 Retinex 模型对大、中、小尺度下 SSR 结果进行综合,从而充分地融合不同尺度下的优点,使多尺度反射结果获得细节保持和动态范围压缩相平衡的视觉效果。基于以上分析,本文采用多尺度 Retinex 算法对红外图像进行处理。

1.2 引导滤波基本理论

图像引导滤波是一个线性移可变的滤波过程,包括引导图像 I , 输入图像 p 和输出图像 q 。引导图像 I 与滤波输出 q 满足局部线性的关键假设,局部线性模型表示为:

$$q_i=a_k I_i+b_k, \quad \forall i \in \omega_k \quad (4)$$

式中: a_k, b_k 为局部窗 ω_k 对应的线性系数; i 是像素索引; ω_k 为以 r 为大小的局部方形窗。

最小化线性模型的代价函数如下:

$$E(a_k,b_k)=\sum_{i \in \omega_k} \left((a_k I_i+b_k-p_i)^2 + \varepsilon a_k^2 \right) \quad (5)$$

式中： ε 为避免 a_k 过大的正则因子。利用线性回归求出(5)式的最优解 a_k, b_k ：

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \overline{\mu_k p_k}}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (6)$$

$$b_k = \overline{p_k} - a_k \mu_k \quad (7)$$

式中： μ_k 和 σ_k^2 为位于 ω_k 局部窗内 I 的均值和方差；

$|\omega|$ 为 ω_k 窗口中像素数目； $\overline{p_k}$ 为位于 ω_k 局部窗口中 p 的均值。

本文中，令引导图像 I 和输入图像 p 相同，则(6)式写为：

$$a_k = \frac{\sigma_k^2}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \quad (8)$$

则(7)式可改写为：

$$b_k = \mu_k(1 - a_k) \quad (9)$$

从(8)(9)关系式中，可以看出 ε 的取值可以决定 a_k, b_k 的大小，结合(4)式把滤波结果可以概括为以下情形：

$\varepsilon=0$ 时， $a_k=1, b_k=0$ ，相当于未对图像做任何处理。

$\varepsilon>0$ 时，依像素位置和图像内容，滤波结果可分为两种情况：

1) 在像素位于平坦区域时， $\sigma_k^2 \leq \varepsilon$ ， a_k 近似等于 0， b_k 近似于 μ_k 。从而(4)式满足 $q_i = \mu_k$ 。此时对图像进行平滑操作。

2) 在像素位于高方差区域时， $\sigma_k^2 \geq \varepsilon$ ， a_k 近似等于 1， b_k 近似于 0。从而(4)式满足 $q_i = I_i$ 。此时实现对边缘的保持作用。

本文又称引导滤波中 ε 为平滑增益。由于该增益为全局参数，而且需要事先人为设定。在利用引导滤波估计 Retinex 模型中的照度分量时，会因 ε 的不同对光照估计结果造成较大影响，所以导致反射分量的巨大差异。当 ε 较小时，反射部分表现为更好地消除

光晕，突出细节，但灰度动态范围过小。相反， ε 较大时，光晕现象更加明显，灰度动态范围较宽，但图像细节增强不足。如图 1 所示为不同的全局平滑参数下的对比结果。引导滤波核尺寸设置为 $r=15$ 。平滑参数设置如图 1 所示。基于此，本文考虑设计出依图像局部特征可变的局部自适应平滑增益 ε ，取代原有的全局参数，从而更加准确地估计照度分量，最终获得消除光晕，保持细节的反射分量结果。

2 本文算法

2.1 光照分量估计

从待处理图像中求取照度分量的过程在数学上是一个病态问题，传统 Retinex 算法采用高斯滤波对照度分量进行估计。高斯滤波器在分配滤波权重时只考虑像素间的距离，忽略了滤波图像自身内容。而双边滤波在考虑图像信息的情况下，对周围像素点进行权重分配既利用像素间空间距离的高斯加权，也结合像素间亮度差异的高斯加权。将双边滤波和引导滤波平滑后得到的低频信号与原始信号进行对比分析，证实引导滤波较双边滤波有更好的边缘保持能力。双边滤波权重函数公式如下：

$$W(x, y) = \frac{1}{k} e^{-\frac{|x-y|^2}{\sigma_s^2}} \cdot e^{-\frac{|u(x)-u(y)|^2}{\sigma_R^2}} \quad (10)$$

在整体信号对比结果上，可看出两种滤波器都有很好的边缘保持能力。但由局部细节对比可以看出，在如图 2 箭头指示的局部细节处，双边滤波的平滑结果表现出梯度值的翻转，没能更好地保持信号的原有梯度信息。在信号处理的角度，无法保持阶跃信号的不变性，表现在二维图像上则为“光晕伪影”的现象。对比实验中参数选取如下：

引导滤波中参数设置为 $r=30, \varepsilon=0.0025$ 。双边滤波参数 $\sigma_s=30, \sigma_R=0.05$ 。

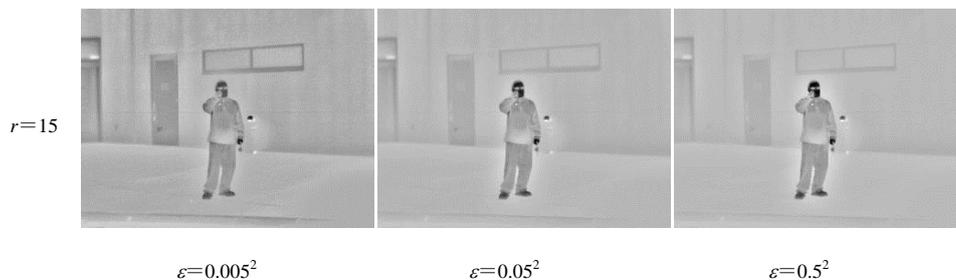


图 1 不同全局平滑参数的对比结果

Fig.1 The comparison results of different global smoothing parameters

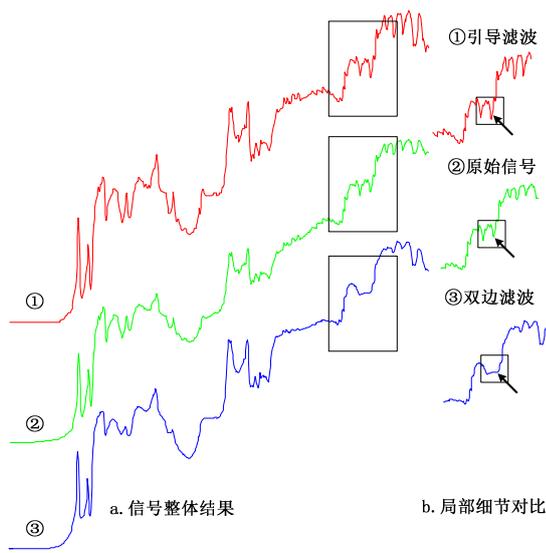


图 2 引导滤波与双边滤波保边性能对比

Fig.2 The edge-preserving performance comparisons between the guide filter and bilateral filter

综上, 本文选择如式(11)所示引导滤波核函数进行照度分量估计:

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k,i,j \in \omega_k} \left(1 + \frac{(I_i - \mu_k) + (I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right) \quad (11)$$

为更好地解决全局参数导致的动态范围压缩, 细节增强, 光晕消除难以平衡的问题, 引入局部方差和局部复杂度相结合的自适应平滑增益 ε , 对图像进行依局部信息可变的光照估计过程。

对于一幅 $N \times M$ 的图像, 假定 $x_{i,j}$ 为图像中某点的灰度值大小, 图像的局部方差^[11]定义为:

$$V(i, j) = \frac{1}{(2n+1)(2m+1)} \sum_{k=i-n}^{n+i} \sum_{l=j-m}^{m+j} (x_{k,l} - m_{i,j})^2 \quad (12)$$

局部方差反映了局部区域对比度突变程度, 对灰度突变强烈的位置较为敏感, 但对某些灰度突变不明显的细节区域则不够敏感。为进一步改善对细节信息的保持效果, 则需要考虑灰度突变程度的同时兼顾灰度的变化频率。文献[12]提出了局部复杂度的概念, 其定义如下:

$$C(i, j) = \sum_{k=0}^{L-1} \text{sgn}(k) \quad (13)$$

式中: $C(i, j)$ 表示以像素 (i, j) 为中心的局部窗口内灰度复杂度。 L 为整幅图像中灰度级总数。 k 为具体的灰度级大小。其中, 符号函数表达形式如下:

$$\text{sgn}(k) = \begin{cases} 1, & \exists f(x, y) = k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

局部复杂度信息可以反映区域的细节层次, 对

微弱的细节变化同样具有敏感性。且局部复杂度大小与人眼所关注的灰度频率变化特性一致, 能很好地刻画图像局部的灰度变化频率。基于此, 本文结合反映人眼对频率敏感特性的对比灵敏度函数 CSF (Contrast Sensitivity Function)^[13] 的函数形式, 由局部方差 $V(i, j)$ 和局部复杂度 $C(i, j)$ 共同构造平滑增益函数 $\varepsilon(i, j)$, 式(16)、(17)中涉及的两者都是归一化结果。经实验验证, $\varepsilon(i, j)$ 与局部方差和局部复杂度的函数关系满足式(15):

$$\varepsilon(i, j) = \delta \times (1 - \alpha) \times \varepsilon_c(i, j) + \alpha \times \varepsilon_v(i, j) \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_v(i, j)$ 与 $\varepsilon_c(i, j)$ 分别为局部方差控制的增益和局部复杂度控制的增益, 两者如式(16)(17)所示:

$$\varepsilon_v(i, j) = \exp^{-V(i, j)} \quad (16)$$

$$\varepsilon_c(i, j) = 18 \times C(i, j) \times \exp^{-8 \times C(i, j)} \times \sqrt{1 + 0.06 \times \exp^{C(i, j) + 0.2}} + 0.05 \quad (17)$$

其中(17)式满足如图 3 所示曲线, 从图 3 曲线可以看出, 由局部复杂度控制的增益 ε_c 满足在灰度变化平缓区域, 即平坦区和纹理细节区, 能保持较小的平滑。随着局部复杂度的增高, 在频率变化强烈抬升后, 能够迅速减小增益, 从而对高频突变区域进行更好的边缘保持作用, 从而消除光晕。在局部复杂度变化大于一定阈值时, 可以实现增益恒定的效果, 从而避免平滑增益过小而无法去除光照影响, 同时防止灰度动态范围过小。

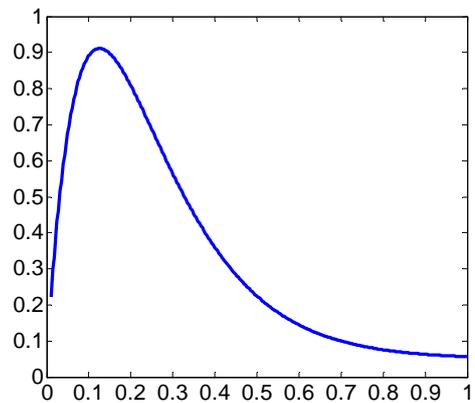


图 3 增益 $\varepsilon_c(i, j)$ 与局部复杂度的关系

Fig.3 The relationship between gain $\varepsilon_c(i, j)$ and local complexity

公式(15)中 δ 为常数, 针对多数图像情形, 实验中设置为 0.02, 控制平滑的基本程度。 α 为决定局部方差和局部复杂度对应增益所占权重的常数。当 $\alpha = 0$ 时, 公式退化为只利用图像局部复杂度信息, 从而更好地保持细节和纹理信息。当 $\alpha = 1$ 时, 公式只利用局部方差信息, 控制对灰度突变边缘的保持, 从而消除光晕现象。 $\alpha \in [0, 1]$, 实际应用中结合图像的结构信息和灰度细节对 α 取值进行设置, 本文中选取 $\alpha = 0.3$ 。

2.2 多尺度反射分量获取

利用多尺度 Retinex 模型对大、中、小尺度下 SSR 算法结果进行综合，在利用引导滤波核函数进行低通环绕时，尺度参数的设置规律可以依图像维数设置小、中、大 3 个尺度，预滤波图像的尺寸为 $N \times M$ 。 r 的大小以 $(2r+1)^2$ 的形式决定滤波方形窗的大小。结合实验结果，可以总结出 r 的取值范围是由图像自身的信息决定的，小尺度 r 取值范围为 $[1, r_{min}]$ ，中等尺度 r 的取值范围为 $[r_{min}, r_{mid}]$ ，大尺度 r 的取值范围为 $[r_{mid}, r_{max}]$ ， $[]$ 代表向下取整操作。

其中 r_{min} , r_{mid} , r_{max} 分别如式(18)(19)(20)所示：

$$r_{min} = [\min(N, M)/2^n] \quad (18)$$

$$r_{max} = [\min(N, M)/2 - 1] \quad (19)$$

$$r_{mid} = \left\lfloor \frac{r_{max} + r_{min}}{2} \right\rfloor \quad (20)$$

式中： n 代表多尺度 Retinex 方法选取尺度的个数，此处取值为 3。利用公式(3)对如上设置求取的单尺度结果融合，进一步获得多尺度的反射分量结果 $R(x,y)$ 。

2.3 最终增强结果生成

基于改进引导滤波的 MSR 算法得到反映物体本质信息的多尺度细节，可单独地对其进行细节增强，最简单的方法是通过反射分量的灰度值乘上一个大于 1 的常数来实现。但如此就会在放大细节的同时，使得高亮区域出现过增强现象。本文设置依细节灰度层级可变的增益因子对多尺度反射结果进行增强。此时增强结果仍存在灰度值范围相对集中，图像对比度低等问题，动态范围较小。为了得到更好的增强效果，在反射分量中去除最小偏移量，旨在去除 $R(x,y)$ 中较低的不可有效显示的边界灰度部分，进一步通过 Gamma 校正，从而改善图像整体视觉质量。最终增强结果 $R'(x,y)$ 满足：

$$R'(x,y) = \eta \times \left[\lambda R(x,y) - \min(R(x,y)) \right]^{\gamma} \quad (21)$$

式中： η 为控制过增强的限定因子，本文中取 5 时能获得良好结果。 γ 取值范围为 $[1, +\infty]$ ，本文取 3 适宜多幅图像。 λ 为以细节强度为变量的局部自适应增强因子，取值满足如式(22)所示函数形式：

$$\lambda(x,y) = 1 + \lambda_1 \cdot e^{-\left(\frac{R(x,y)}{\lambda_2}\right)^2} \quad (22)$$

函数关系符合依强度增大而衰减，但最小值要大于 1。 λ_1 为 2，限制细节放大的最大倍数， λ_2 取值范围为 $[1, 1.5]$ 。本文 λ_2 取值为 1.2。反映放大系数随细节强度衰减的程度。经上述过程，可以得到有效消

除“光晕伪影”，避免灰度过增强，细节清晰的最终图像，本文算法尤其对暗区细节表现出较好的增强效果。

3 实验结果与分析

为验证算法的有效性，本文在 Matlab R2011a 平台（处理器为 Intel Core 双核，主频为 2.53 GHz，内存 2 GB）上，将本文算法与多种基于 Retinex 原理算法进行比较，包括 SSR 算法，MSR 算法，基于双边滤波的 B-SSR 算法，基于未改进引导滤波的多尺度 G-MSR 算法。以上对比算法的参数设置如下：① SSR 参数设置为 $\sigma=120$ 。② MSR 参数设置为 15, 80, 240。③ B-SSR 算法的双边滤波参数设置为 $w=15$, $\sigma_S=100$, $\sigma_R=0.3$ 。④ G-MSR 算法参数的设置根据式(18)(19)(20)确定。本文算法的参数设置为 $\alpha=0.3$ ，局部信息度量的窗口为 5×5 ，多尺度的尺度参数设置与 G-MSR 算法相同。

3.1 主观视觉效果评价：

本文选取 3 幅具有代表性的室外远距离、室内、室外近距离红外图像进行主观视觉验证，3 组实验的结果分图 4，图 5，图 6 所示。

由图 4，图 5，图 6 可以看出，SSR 算法获取的图像动态范围过于单一。基于双边滤波 Retinex 算法在处理图像时在对比度强烈处光晕现象较为明显，尤其在图 4 矩形框局部细节处，楼宇与天空交界面 B-SSR 方法光晕表现尤为突出。MSR 算法因多尺度融合可以获取细节更加丰富的图像增强结果，但因图像对比度低，图像整体视觉效果较差。基于引导滤波的 G-MSR 算法因良好的边缘保持能力，有效减弱了光晕现象，但对图 6 人的轮廓处仍存在微弱的光晕伪影。本文算法处理的图像结果在有效去除光晕现象的同时，能够很好地突显暗区的细节纹理信息。图像的整体对比度和清晰度得到了明显的提高，具有较好的视觉效果。

3.2 定量指标对比分析

本文采用图像均值，标准差，信息熵等指标对图像质量进行定量评价。图像均值用于评价图像平均亮度的变化，值的大小代表亮度明暗程度。标准差代表图像的对比度，其值越大表示对比度越强。信息熵衡量图像的信息量，其值越大代表图像中信息越丰富，计算公式为 $E = \sum_{k=0}^{L-1} -p_r(r_k) \cdot \log_2 p_r(r_k)$ 。SSR 算法均值和标准差都较原图减小，这就意味着增强图像的

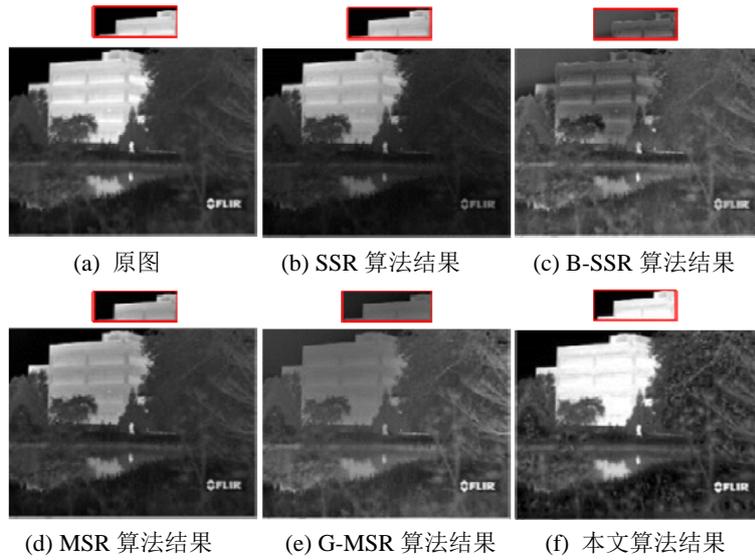


图 4 室外远距离场景的增强结果比较

Fig.4 The enhancement results comparison of an outdoor distant scene

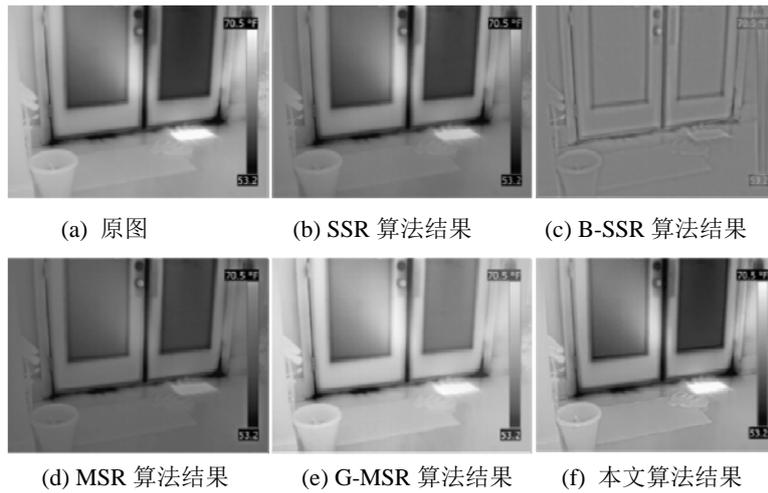


图 5 室内场景的增强结果比较

Fig.5 The enhancement results comparison of an indoor scene

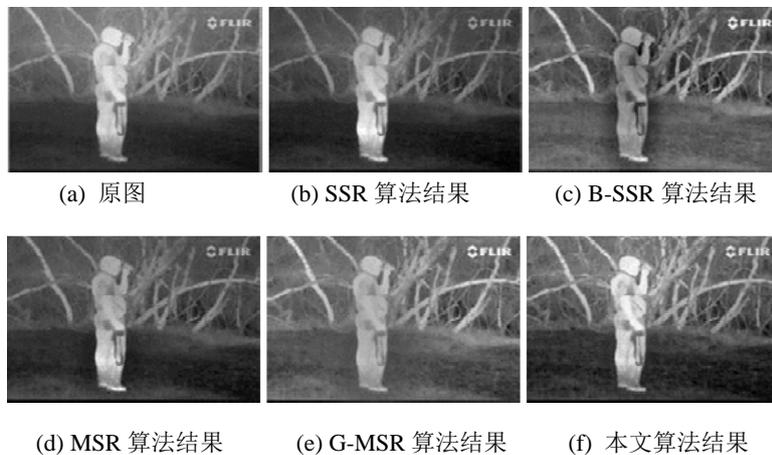


图 6 室外近距离场景的增强结果比较

Fig.6 The enhancement results comparison of an outdoor close scene

亮度和对比度较原图会有所降低。B-SSR 方法对 3 幅不同场景图像处理时，标准差和信息熵皆下降明显，反映为图像信息量明显减少。MSR 和 G-MSR 算法处理图像的标准差皆明显不及原图，图像对比度不足。表 1 中数字表明，本文算法并不能在均值，标准差，信息熵 3 方面同时达到最优，但在总体指标对比上，本文算法仍统计占优。定量分析结果与主观视觉效果基本一致，可证实本文算法的有效性和优越性。

4 结论

本文通过分析传统 Retinex 算法处理红外图像存在光晕伪影和细节增强不足的原因，利用图像局部信息对引导滤波中的平滑参数进行自适应设置，进行区域可变的低通滤波光照估计过程，从而实现

对光照分量的准确估计。对保持细节和光晕消除的多尺度本质信息，以偏移调整和 Gamma 校正改善图像亮度和对比度，实验结果表明，本文方法能够实现对光晕伪影的消除和细节的增强，能够获得对比度较好，图像视觉效果清晰的增强效果。本文算法尤其对整体亮度较低的红外图像有较好地增强效果，可有效提升暗区细节信息，但对亮度较高的红外图像增强效果受偏移调整和 Gamma 校正中参数影响较大，会出现过冲现象。在后续工作中，研究其他的有界运算替代原有的对数域运算，从而更好地避免灰度过冲和越界现象的发生，将是接下来的关注方向。

表 1 图像定量评价指标对比

Table 1 Comparison of image quantitative evaluation indexes

增强算法	均值			标准差			信息熵		
	图 4	图 5	图 6	图 4	图 5	图 6	图 4	图 5	图 6
原图	74.9502	137.2508	96.3572	62.5405	49.9593	49.7882	6.4946	7.2593	7.0280
SSR	53.0124	112.6281	76.1721	52.4471	35.3282	44.8584	6.6003	6.7978	7.0555
B-SSR	84.9354	127.7484	100.0072	23.2654	11.6245	30.9149	6.2372	4.8140	6.6910
MSR	63.8809	94.9898	79.0792	44.7844	24.8450	38.7379	6.8095	6.1796	6.9970
G-MSR	82.4143	173.5488	111.5868	25.5884	37.9876	35.0511	6.5367	6.9434	6.8838
本文算法	128.3150	137.4397	96.3954	39.9023	50.0582	53.6854	7.0497	7.3068	7.0724

参考文献:

- [1] 莫春和, 段锦, 付强, 等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(下)[J]. 红外技术, 2014, 36(4): 265-270.
MO Chun-he, DUAN Jin, FU Qiang, et al. Review of polarization imaging technology for international military application(II)[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 265-270.
- [2] FAN Zun-lin, BI Du-yan, HE Lin-yuan, et al. Noise suppression and details enhancement for infrared image via novel prior[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 74: 44-52.
- [3] 龚璐, 沈国土, 蔡继光, 等. 典型物体表面温度的测量及初步计算[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 439-442.
GONG Lu, SHEN Guo-tu, CAI Ji-guang, et al. Measurement and preliminary calculation of typical object surface temperature[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 439-442.
- [4] JOBSON DANIEL J, RAHMAN Zia-ur, WOODSELL Glenn A. Properties and performance of a center/surround Retinex[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.
- [5] KIMMEL Ron, ELAD Michael, SHAKED Doron, et al. A variation framework for Retinex[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2003, 52(1): 7-23.
- [6] JOBSON Daniel J, RAHMAN Zia-ur, WOODSELL Glenn A. A multi-scale Retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(7): 965-976.
- [7] ELAD Michael. Retinex by two bilateral filters[C]//*Scale Space and PDE Methods in Computer Vision Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3459: 217-229.
- [8] 许欣, 陈强, 王平安, 等. 消除光晕现象的快速 Retinex 图像增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(10): 1326-1331.
XU Xin, CHEN Qiang, WANG Ping-an, et al. A fast halo-free image enhancement method based on Retinex[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(10): 1326-1331.

- [9] 汪荣贵, 张璇, 张新龙, 等. 一种新型自适应 Retinex 图像增强方法研究[J]. *电子学报*, 2010, **38**(12): 2934-2936.
WANG Rong-gui, ZHANG Xuan, ZHANG Xin-long, et al. A novel adaptive Retinex algorithm for image enhancement[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(12): 2934-2936.
- [10] 毕国玲, 续志军, 赵建, 等. 基于照射-反射模型和有界运算的多谱段图像增强[J]. *物理学报*, 2015, **64**(10): 10071-1-10071-9.
BI Guo-ling, XU Zhi-jun, ZHAO Jian, et al. Multispectral image enhancement based on irradiation-reflection model and bounded operation[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015, **64**(10): 10071-1-10071-9.
- [11] LEE Jong-Sen. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, **2**(2): 165-168.
- [12] 刘艳莉, 桂志国, 张权, 等. 基于局部梯度和复杂度的反锐化掩膜法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, **35**(7): 1540-1545.
LIU Yan-li, GUI Zhi-guo, ZHANG Quan, et al. Unsharp masking algorithm based on local gradient and complexity[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, **35**(7): 1540-1545.
- [13] 于天河. 针对人眼视觉特性的红外图像增强技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 36-40.
YU Tian-he. Research on enhancement technique of infrared image for human visual system[D]. *Ha'erbin: Harbin Institute of Technology*, 2009: 36-40.

(上接第 148 页)

- [8] 武妍, 万伟. 基于遗传算法设计和训练人工神经网络的方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(1): 65-68.
WU Yan, WAN Wei, Method on design and training of artificial neural network based on genetic algorithm[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(1): 65-68.
- [9] 周强, 白廷柱, 刘明奇, 等. 基于可见光图像的近红外场景仿真[J]. *红外技术*, 2015, **37**(1): 11-15.
ZHOU Qiang, BAI Ting-zhu, LIU Ming-qi, et al. Near infrared scene simulation based on visual image[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(1): 11-15.
- [10] FAN X, HU B, LI Z, et al. Real-time compression system research based on DMD hadamard transform spectrometer[J]. *Procedia Engineering*, 2010, **7**: 297-303.
- [11] 高勇, 尹琦, 李存华. JPEG2000 编码方案和结构划分研究[J]. *计算机与信息技术*, 2007, **12**: 16.
GAO Yong, YIN Qi, LI Cun-hua, Study of JPEG2000 coding scheme and structure division[J]. *Computer and Information Technology*, 2007, **12**: 16.
- [12] LIAN C J, CHEN K F, CHEN H H, et al. Analysis and architecture design of block-coding engine for EBCOT in JPEG 2000[J]. *IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology*, 2003, **13**(3): 219-230.