

# 一种基于大气散射模型和 Retinex 的红外图像去雾算法

董浩伟, 陈 洁

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 基于红外图像和可见光图像在有雾天气下退化过程中的相似性, 可以使用大气散射模型对红外图像进行图像复原。但是图像在去雾复原处理后常常会有对比度低, 细节不明显的特点, 不利于人眼直接观察。针对这一情况, 使用 Retinex 对去雾后的图像进行对比度增强。经过这两个算法处理后可以提高红外图像的对比度, 突出其细节, 提高其信噪比, 并且具有良好的视觉效果。对算法的改进可以在计算处理速度和算法处理的效果上找到一个平衡点, 为后期的嵌入式平台实现实时的视频去雾打下基础。

**关键词:** 大气散射模型; 去雾; Retinex

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2019)04-0347-10

## Infrared Image Defogging Algorithm Based on Atmospheric Scattering Model and Retinex

DONG Haowei, CHEN Jie

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** According to the similarities between the image degradation in infrared and visible light images in foggy weather, we can defog foggy infrared images by using an atmospheric scattering model. However, after the image is defogged, the image often has low contrast and inconspicuous details, which is not conducive to direct observation by humans. To combat this, the Retinex algorithm was used to enhance the contrast of the image after defogging. Processing the image with these two methods can improve its contrast, highlight its details, improve the signal to noise ratio, and have a good visual effect. Improvements to the algorithm can be aimed towards balancing the calculation speed and the processing effect, while laying the foundation for real-time video defogging in embedded platforms in the future.

**Key words:** the atmospheric scattering model, defog, Retinex

## 0 引言

夜视技术的出现为全天候作战提供了可行性, 在军事夜战中夜视技术占据极其重要的地位。红外成像技术将人眼的观察范围扩大到光谱红外区, 大大提高人眼观察的区间<sup>[1]</sup>。雾和霾是一种常见的天气现象, 并且由于近几年空气质量严重恶化, 雾霾等恶劣天气频繁出现。雾霾天气下, 大气环境中存在着大量的悬浮颗粒, 传播过程中光线会受到这些悬浮颗粒散射的影响。和无雾场景相比较, 图像的清晰度和对比度都会被衰减, 从而影响整体的视觉效果<sup>[2]</sup>。在使用过程中, 很可能由于图像质量太差而无法获得特定细节, 使得红外成像系统失去其应用价值。虽然近红外的热像仪因其波长较短, 在传播的过程中受空气溶胶影响

较小, 本身具有一定的透雾功能。但是现在红外热像仪主要工作于中波和长波波段, 受雾霾影响严重, 所以对红外图像的去雾研究还是很有必要的。

## 1 红外图像去雾

对红外图像进行去雾研究时, 往往借鉴于可见光图像的去雾算法, 可见光的去雾算法一般包括图像增强和基于物理模型的图像复原。由于红外图像成像的特殊性, 红外图像的对比度、信噪比、分辨率都弱于可见光图像。如果直接采用传统的可见光图像去雾算法来对红外图像进行去雾处理, 处理后的图像效果一般都不太好, 因此需要针对红外图像对去雾算法进行改进优化<sup>[3]</sup>。

### 1.1 大气散射模型

收稿日期: 2018-10-31; 修订日期: 2019-01-03.

作者简介: 董浩伟 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外图像处理技术。E-mail: 531467221@qq.com.

图像复原主要依据的是 McCartney 在 1975 年提出的大气散射模型<sup>[4]</sup>,是图像去雾复原最常用的模型。该模型通过对复杂的大气散射作用的分析,找到了雾天条件下图像退化的原因。雾天情况下,大气散射模型中大气光成像模型和衰减模型同时存在且起决定性作用,正是由于这两个因素的同时影响,才导致目标图像的分辨率和对比度降低。即雾天大气中的媒介的影响,使得物体的反射光能量衰减和周围的环境杂散光也会参与成像。大气散射模型给我们的思路就是补偿反射光能量的衰减,并且消除大气光参与成像的部分就能复原出清晰的无雾图像。大气散射模型如图 1 所示。

经过大气衰减后景物的反射光可以表示为  $J(x)e^{-\beta d(x)}$ ,周围环境中的各种光经过大气悬浮微粒散射产生的环境光表示为  $A(1 - e^{-\beta d(x)})$ 。有雾图像可以表示为:

$$I(x) = J(x)e^{-\beta d(x)} + A(1 - e^{-\beta d(x)}) \quad (1)$$

式中:  $x$  为景物离成像设备的距离;  $I(x)$  为观察到的有雾图像;  $J(x)$  为没有受雾气影响的原图像;  $A$  为大气光值;  $\beta$  为大气散射系数;  $d(x)$  表示的是景物和观察位置之间的距离;  $e^{-\beta d(x)}$  表示的是透射率,如果用  $t(x)$  表示,即:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad (2)$$

则(1)式可以表示为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)] \quad (3)$$

在式(3)中仅仅是  $I(x)$  有雾图像已知,其他 3 项均是未知项,通过大气散射模型可知,只要计算出透射率  $t(x)$  和大气光值  $A$  就能求得去雾后的图像。

## 1.2 红外图像退化特性

红外图像因其光谱成像的特性表征的是物体的温度分布,灰度值对应着物体的温度值。由于在相同环境中物体之间的不间断传热和热辐射,红外图像表

现出强烈的空间相关性相对集中的灰度值和比较差的对比度。此外,穿过大气层到达红外成像系统物体的热辐射必然受到大气衰减的影响。文献[5]中提到大气对红外辐射的总衰减公式为:

$$\tau_a(\lambda) = e^{-(\mu_{H_2O} + \mu_{CO_2})L + \mu_s(\lambda)L - (\mu_r + \mu_s)L} \quad (4)$$

式中:  $\mu_{H_2O}$ 、 $\mu_{CO_2}$  是  $H_2O$ 、 $CO_2$  对红外辐射的吸收系数;  $\mu_r$  及  $\mu_s$  为雨雪天气造成的衰减系数;  $\lambda$  为波长;  $L$  为红外辐射的等效路程。若令  $\beta$  为总衰减系数:

$$\beta = \mu_{H_2O} + \mu_{CO_2} + \mu_s(\lambda) - (\mu_r - \mu_s) \quad (5)$$

则(3)式可以改写为:

$$\tau_a(\lambda) = e^{-\beta L} \quad (6)$$

对比式(2)和式(6)可以认为,红外图像和可见光图像受雾霾天气的影响具有相似性,因此大气散射模型同样可以近似适用于红外有雾图像的恢复<sup>[6]</sup>。

## 1.3 大气散射模型去雾

利用提出的各种假设与先验后,研究者们已经发展出多种基于大气散射模型的图像去雾和图像复原方法。Narasimhan<sup>[7]</sup>在场景深度和大气条件信息未知的情况下,结合大气散射模型,通过用户交互来获得必要的附加信息,实现了雾天单幅图像的复原。Tan<sup>[8]</sup>将“无雾图像比有雾图像对比度高”作为切入点,通过扩大雾天图像的局部对比度进行去雾。KIM<sup>[9]</sup>提出了基于对比度优化的去雾算法,核心思想就是建立能量损失函数,最优化使得对比度最大,该算法速度快而且有自动优化对比度的作用,处理后改善效果明显。HE<sup>[10]</sup>通过大量的统计实验发现了暗原色先验规律,并利用这个先验规律较好地实现了图像去雾。本节采用大气散射模型实现红外图像模糊现象的去除。用  $L(x)$  表示环境光项:

$$L(x) = A[1 - t(x)] \quad (7)$$

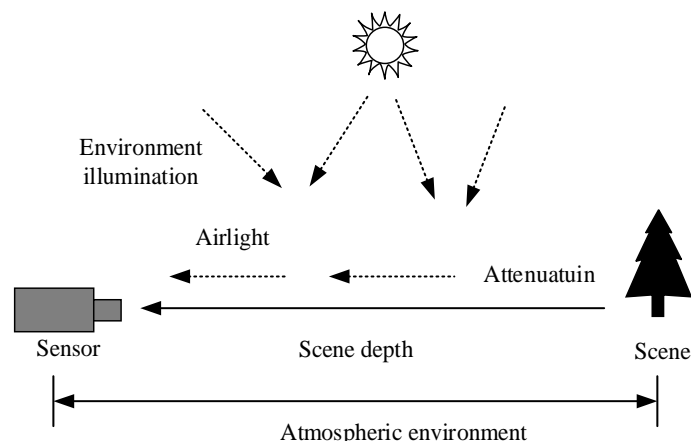


图 1 大气散射模型 Fig.1 The atmospheric scattering model

$$J(x) = \frac{I(x) - A(1 - t(x))}{t(x)} = \frac{I(x) - L(x)}{1 - L(x)/A} \quad (8)$$

从大气散射模型知道,恢复出无雾图像,只需要排除环境光和反射光衰减的影响。也就是需要去除环境光即  $I(x) - L(x)$ , 补偿衰减的反射光, 即  $1 - \frac{L(x)}{A}$ , 这项表达的意思也是对去除模糊后红外图像的对比度拉伸增强。所以只需要求得环境光  $L(x)$  和大气光值  $A$ , 就能恢复出无雾图像。

$$A(1 - t(x)) \leq I(x) \quad (9)$$

由上式知:

$$t(x) \geq 1 - L(x)/A \quad (10)$$

由式(2)可知,  $t(x)$  随着景物深度  $d$  的增大而减小,  $t(x)$  值越小则是表明像素  $(x)$  处景物反射光衰减的程度就越大。当  $t(x)$  为 0 时, 表示反射光衰减为 0, 此时  $I(x) = A$ , 当  $t(x)$  为 1 时, 表示景物反射光完全没有衰减, 此时  $I(x) = J(x)$ , 证明图像没有受到雾气的影响, 透射率  $t(x)$  具有和景物深度相似的趋势, 即在深度缓变处平滑, 在深度不连续处随之跳变。

由于  $t(x) = \exp(-\beta d)$  表示了透射率  $t(x)$  和场景深  $d$  的关系<sup>[11]</sup>, 可以认为在一个局部方块中(场景的深度未发生改变), 认为透射率是一个常数值, 记为  $\tilde{t}$ 。对式(10)进行均值滤波如下:

$$\text{average}_{sv} \left( 1 - \frac{I(x)}{A} \right) = 1 - \frac{\text{average}_{sv}(I(x))}{A} \quad (11)$$

记  $I_{ave}(x) = \text{average}_{sv}(I(x))$ , 于是得出透射率的粗略估计值为:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \frac{I_{ave}(x)}{A} + \varphi \frac{I_{ave}(x)}{A} \quad (12)$$

上式又称为弥补的偏移项,  $0 \leq \varphi \leq 1$ , 记  $\delta = 1 - \varphi$ , 则:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \delta \frac{I_{ave}(x)}{A} \quad (13)$$

对  $\delta$  的取值进行如下的分析, 当  $\delta$  的取值较小时, 透射率的取值就较大, 我们最后得到的图像雾气去除得较少, 图像整体的偏白; 当  $\delta$  取值较大时, 透射率取值较小, 最终恢复的图像整体较为暗淡。为了防止去雾后的图像出现整体画面偏暗或者偏亮的情况, 设置  $\tilde{\delta} = \rho I_{av}$ , 其中,  $\rho$  为可调节的参数, 且  $0 \leq \rho \leq 1/I_{av}$ ,

为了处理过程简单, 首先对  $I(x)$  中的元素归一化处理,  $I_{av}$  是  $I(x)$  中所有元素的均值, 所以  $I_{av} \in [0, 1]$ 。由于  $I_{av}$

是和原图像的整体灰度分布情况相关的值, 使得  $\tilde{\delta}$  具有自动调节去雾后图像增提亮度的作用, 源图像越暗,  $I_{av}$  的值就越低, 透射率相应的增大, 使得去雾后的图形不会过于暗淡, 反之亦然。

为了保证  $\varphi$  值不过小, 需要对  $\delta$  值的上限进行设置, 这里设定上限为 0.75, 因为红外图像本身偏暗, 需要增大透射率获得较好的观感。则取  $\delta = \min(\rho I_{av}, 0.75)$ , 可以得出:

$$t(x) = 1 - \min(\rho I_{av}, 0.75) \frac{I_{ave}(x)}{A} \quad (14)$$

将  $t(x)$  带入(7)式得到:

$$L(x) = \min(\rho I_{av}, 0.75) I_{ave}(x) \quad (15)$$

Tan 方法中选取输入图像的亮度最大值的点的灰度值作为全局大气光值, 虽然步骤简单, 但是实际效果很差, HE 从暗原色中选取最亮的 0.1% 比例的像素, 然后选取原输入的图像的这些具有最大灰度值作为全局的大气光值时空复杂度较高。而  $0 \leq t(x) \leq 1$ ,  $A \geq \max[I_{ave}(x)]$ , 而一般情况下我们认为全局大气光值  $A \leq \max[H(x)]$ , 于是  $\max[I_{ave}(x)] \leq A \leq \max[I(x)]$ , 因此可以表示为:

$$A = \mu \max[I_{ave}(x)] + (1 - \mu) \max[I(x)] \quad (16)$$

其中  $0 \leq \mu \leq 1$ , 由于准确的  $\mu$  值很难得到, 综合考虑后选取  $\mu = 0.5$ , 则有:

$$A = \frac{1}{2} (\max(I_{ave}(x)) + \max(I(x))) \quad (17)$$

由上就求得了环境光  $L$  和大气光值  $A$ , 代入(8)式得到:

$$J(x) = \frac{I(x) - L(x)}{1 - \frac{L(x)}{A}} \quad (18)$$

## 2 Retinex 对比度增强

Retinex 算法<sup>[12]</sup>最早是由 Edwin H. Land 和 McCann 于 1971 年共同合作提出的, Retinex 是“Retina”(视网膜)和“Cortex”(大脑皮层)两个单词的缩写。Land 在实验中发现, 人类的视觉系统在视觉信息传递过程会自动去除光源强度和不均匀照明等不确定因素, 而只对物体的固有信息敏感。人类视觉系统会自动根据物体的反射特性而调节感知的颜色和亮度。因此算法可以用于自然地平衡调整图像的动态范围和对比度, 更符合人类的视觉。对短波、中波和长波的反射能力决定了物体的颜色, 而这种反

射能力和光源无关只取决于物体的固有性质。**Retinex**原理如图2所示，入射光和物体的反射率决定了观察到的图像，表示为：

$$F(x,y)=R(x,y)I(x,y) \tag{19}$$

式中： $F(x,y)$ 是观察到的图像； $I(x,y)$ 表示入射光，代表环境光的照射分量，决定了图像的动态范围； $R(x,y)$ 表示物体的反射性质，表示包含图像细节信息的物体反射分量，决定了图像的内在性质；**Retinex**算法的基本原理就是从观察到的图像中估计出  $I(x,y)$ ，然后根据(19)式求得  $R(x,y)$ ， $R(x,y)$ 只与物体的固有属性有关不依赖于光源，因此可以消除光照强度不均匀的影响。为了处理简单，将转换到对数域进行处理，如图3所示，给出了 **Retinex** 的算法过程框图。表达形式如下所示：

$$f=r+i \tag{20}$$

基于中心环绕的 **Retinex** 算法易于实现且处理速度较快，代表的处理算法有单尺度 **SSR**（Single-Scale **Retinex**）和多尺度 **MSR**（Multiple-Scale **Retinex**），主要基于的是视网膜和神经元的函数原理，在算法中实现的方式是当前像素和邻近像素的加权平均。单尺度 **SSR** 表示为：

$$\begin{aligned} r(x,y) &= \lg(R(x,y)) = \lg \frac{F(x,y)}{I(x,y)} \\ &= \lg F(x,y) - \lg [G(x,y) * F(x,y)] \end{aligned} \tag{21}$$

式中： $*$ 表示卷积运算，卷积项表示的空间照度的计算，主要实现的方式是通过计算当前像素与邻域像素的加权平均值的比值来减少光照不均匀的影响。经过 **Retinex** 处理后的图像细节信息增多，暗区域的对比度也增强。 $G(x,y)$ 表示环绕函数，环绕函数<sup>[13]</sup>通常采用高斯函数的形式，如下：

$$G(x,y)=k\exp(-\frac{(x^2+y^2)^2}{c^2}) \tag{22}$$

式中： $c$ 为尺度常数，尺度  $c$  越大，图像颜色越自然，图像的色感一致性较好，但局部细节不清晰。红外灰度图像的色感一致性指的是不同亮度下分辨灰度级的能力。尺度  $c$  越小，图像局部细节突出，动态范围压缩越强，但是全局照度丢失，图像泛白。其中  $k$  是归一化常数，满足：

$$\iint \frac{1}{k \cdot G(x,y)} dx dy = 1 \tag{23}$$

单尺度方法很难在实现动态范围的压缩和保持色感一致性两方面均取得良好结果。为了在这两个方面达到平衡，选用多尺度 **Retinex** 算法。**MSR**<sup>[14]</sup>是多个不同尺度的 **SSR** 处理结果加权平均：

$$R(x,y)=\sum_{i=1}^N \omega_i \{ \lg F_i(x,y) - \lg [G_i(x,y) * F_i(x,y)] \} \tag{24}$$

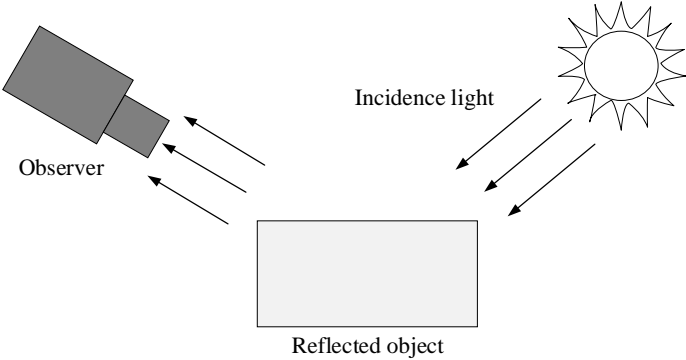


图2 Retinex 原理图 Fig.2 Retinex schematic

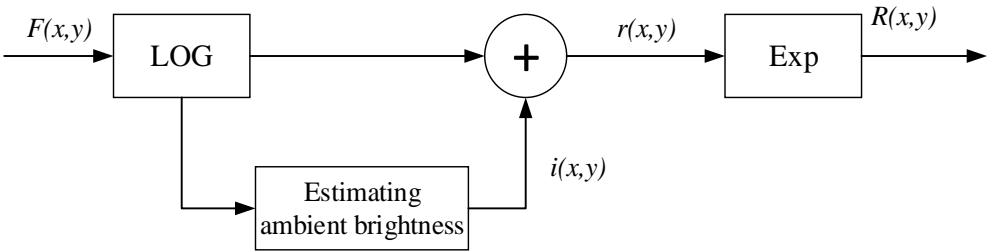


图3 Retinex 算法流程图 Fig.3 The flow chart of Retinex algorithm

式中:  $N$  表示选择 SSR 的个数;  $\omega_i$  表示加权系数;  
当  $N=1$  时, 就是单尺度 SSR 的情况,  $G_i$  表示不同尺度的高斯环绕函数, 表示为:

$$G(x,y)=k\exp(-\frac{(x^2+y^2)^2}{c_i^2})$$

(25)

式中:  $c_i$  表示不同的尺度因子, 一般情况下当  $N=3$ ,  $\omega_i=1/3$  时, 使用较多的是采用一个大尺度, 一个中尺度和一个小尺度可以取得较好的处理结果<sup>[15]</sup>。在针对于红外灰度图像时, 大尺度取值  $c>100$ , 中尺度  $c$  取值在  $50\sim100$  之间, 小尺度取值范围为  $c<50$ 。MSR

方法可以将不同尺度的优点融合, 既能在保持色感一致性的同时又能兼顾图像的动态范围压缩。

3 实验结果分析

红外图像也属于灰度图像, 因为效果更为明显, 使用灰度图像对算法的合理性及可行性进行验证, 如图 4 所示, 去雾后的图像细节变清晰, 白色的雾气明显减少, 但是图像的整体偏暗, 对比度较低, 经过 Retinex 算法增强后图像对比度增加, 图像细节更加清晰, 具有很好的观感, 说明该算法能很好地对灰度图像进行去雾增强。因为 Retinex 算法也可以用于图像的去雾增强, 对原图像直接使用 Retinex 算法。

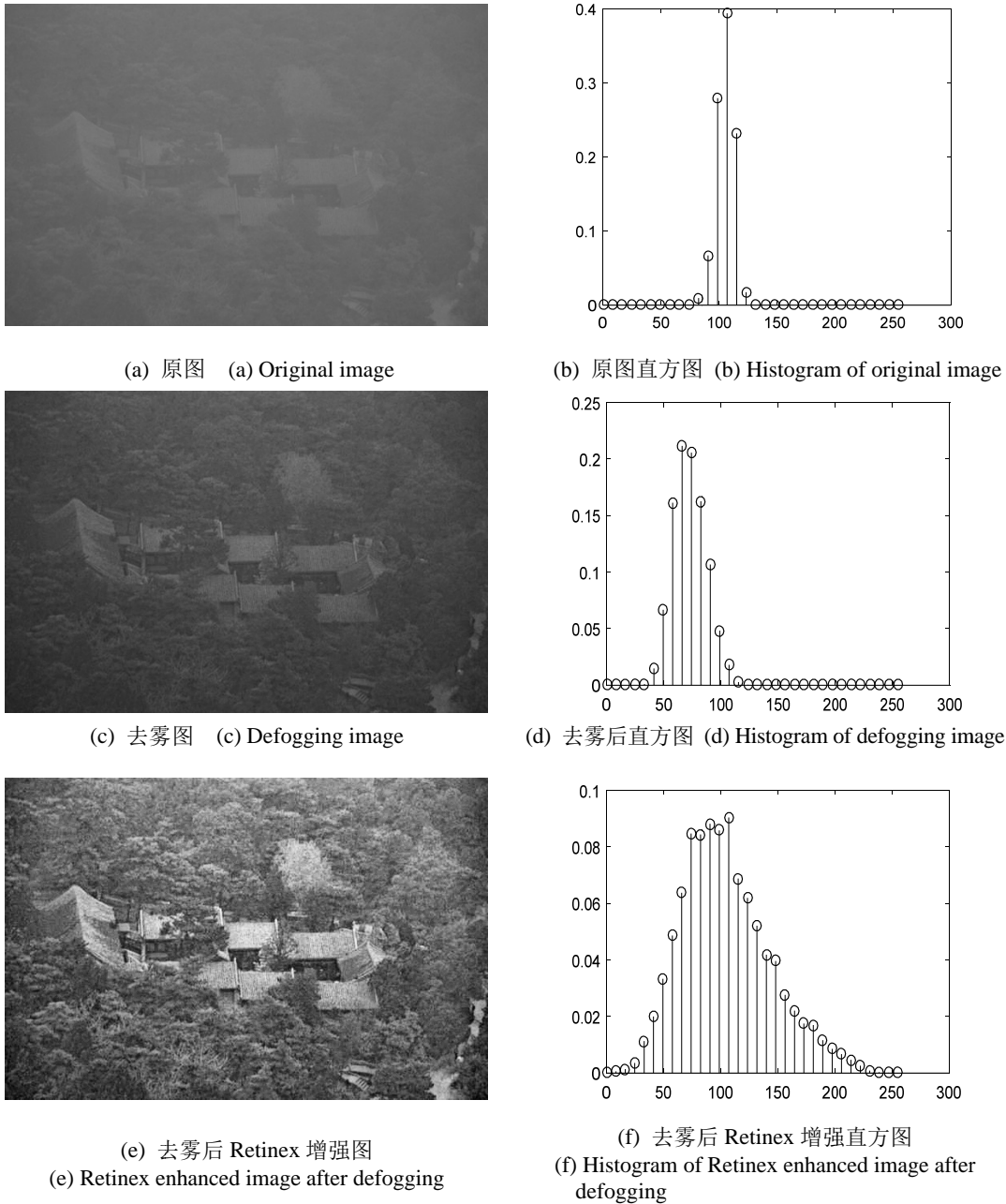


图4 去雾效果及直方图 Fig.4 Defogging results and histograms

从图 5(a)可知,原图直接经过 Retinex 增强后,图像整体变得明亮,视觉效果提升。图 5(b)知,对比度增强,图像动态范围扩大,但是没有达到去雾的效果,在图上还可以看到一层薄薄的雾气存在。那如果存在雾气,再对 Retinex 算法后的图像进行去雾处理,处理结果如图 6 所示。

首先经过 Retinex 算法去雾处理的图像细节模糊,对比度较低而且出现了块状效应,所以我们实验得出的结论和我们分析的结果一样,首先对原图像进行去雾处理,去除图像中的雾气,然而去雾后的图像对比度较低,使用 Retinex 算法对去雾后的图像进行增强。

去雾算法中,对于同一幅图像,  $I_{av}$  保持不变,当  $0 \leq \rho \leq 0.75/I_{av}$  时,主要影响去雾效果的是  $\rho$  值,  $\rho$  值越大,去雾的程度也越大,超出范围则调节无效。实验的过程中发现灰度图像偏亮,  $\rho$  值一般选取在 [1.2,1.4], 红外图像整体偏暗,  $\rho$  值一般选取在

[1.4,1.6], 在此范围内时可获得较好的效果。此参数的有效范围只针对本实验的图片。图 7 是对可见光灰度图和红外图像灰度图处理的结果,从图中可知本文的算法有较好的效果。

4 图像去雾效果评价

为了对比不同去雾算法效果的优劣,通常会对处理后的图像质量进行评价。对图像质量的评价一般有主观评价和客观评价,主观评价<sup>[15]</sup>就是通过人眼来主观的评价图像质量恢复的好坏。由于不同人之间评价的结果差别较大且样本较少时不具备说服力,一般采用的是客观的评价方法。通过数学的方法计算图像的各个指标来判断,而去雾图像的效果评价又不同于其他图像,由于标准图像或者无雾图像难以获取,只能通过去雾前后对比或者对去雾后的图像评价<sup>[16]</sup>。

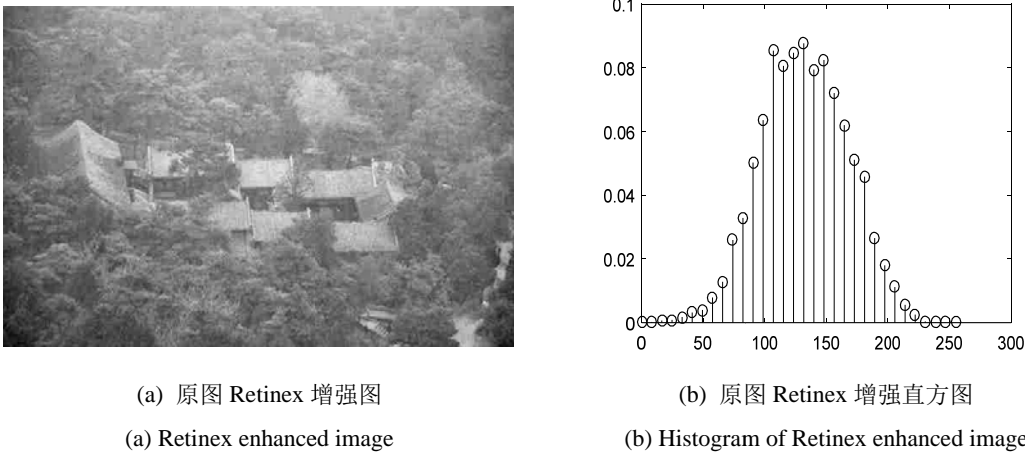


图5 原图 Retinex 增强后结果和直方图

Fig.5 Retinex enhanced image and histogram

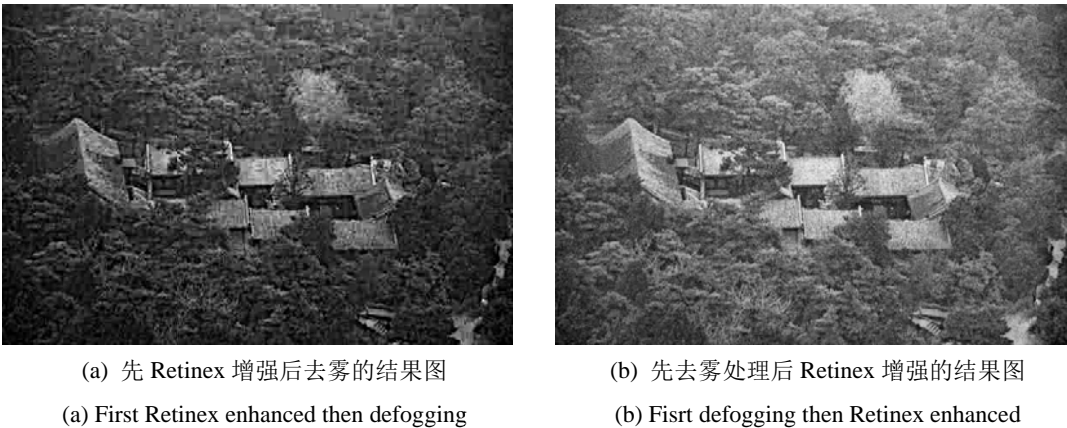


图6 处理结果对比图

Fig.6 Comparison of processing results

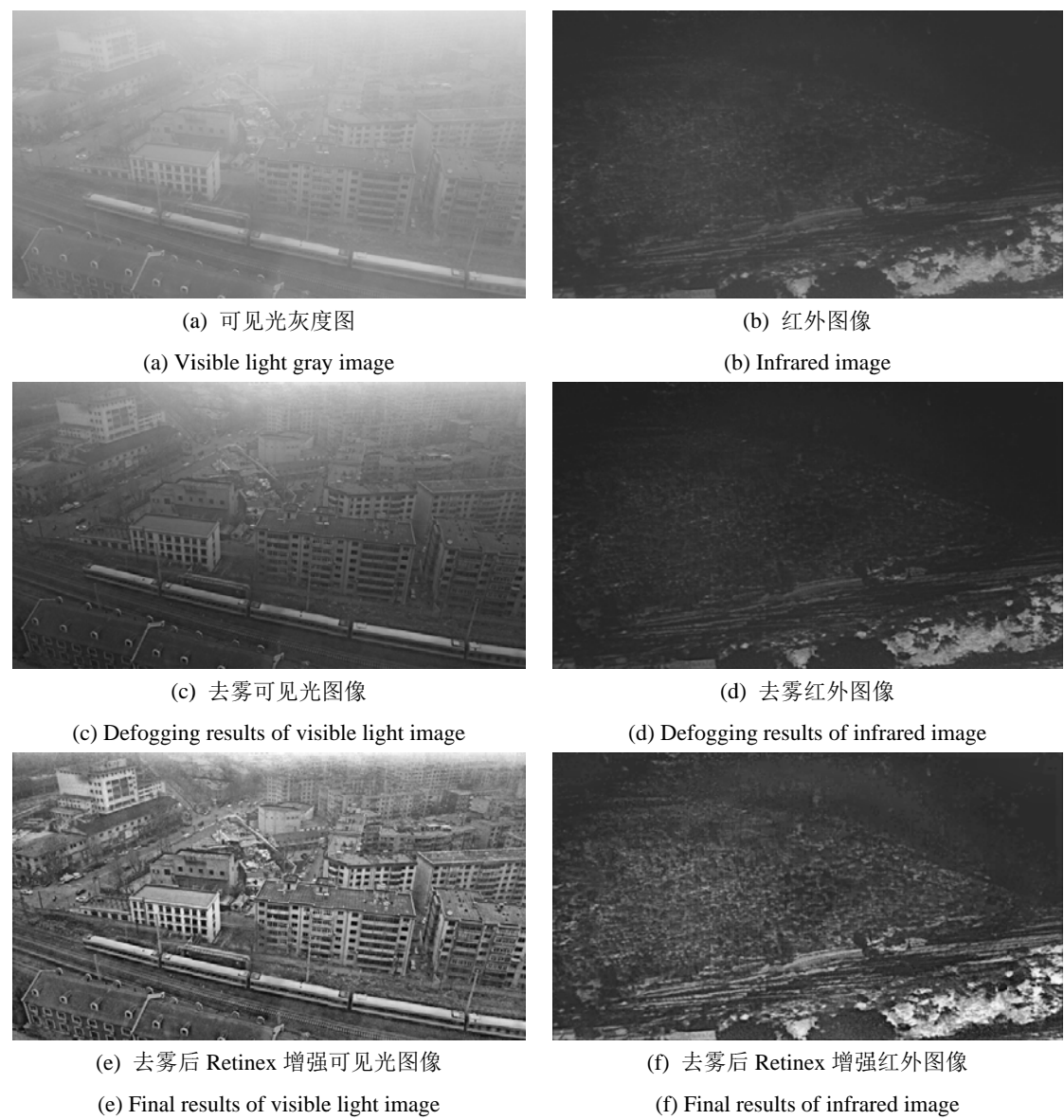


图 7 可见光图像和红外图像处理结果

Fig.7 Processing results of visible light image and infrared image

图 8 是对同一张图片采用不同的去雾方式, HE 为暗原色去雾, KIM 为基于对比度优化的去雾和去雾后的图像都经过 Retinex 去雾增强, 当前, 对于不同的图像去雾算法, 并没有一个统一的客观评价标准。对上述实验的去雾算法的结果进行分析, 分别通过 3 个不同的角度对去雾图像进行评价<sup>[17]</sup>。

第一个角度是基于像素点之间的误差, 通过对比图像去雾处理前后像素之间的差异。用于该角度的指标是均方误差 MSE (Mean Square Error) 和峰值信噪比 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)。衡量的是图像失真或者是噪声水平的客观标准, 两个图像之间的 PSNR 越大则越相似。

第二个角度是基于图像几何组成, 对比图像去

雾处理前后结构的相似性, 反映了图像中物体结构的相似性, 使用的客观指标是 SSIM (Structural SIMilarity) <sup>[18]</sup>。

如表 1 中所有的指标都是相对于原图计算得到的, 从图中看出经过 MSR 增强后图像 MSE 均方差和 PSNR 峰值信噪比都有提升, 而 SSIM 则都降低了, 可能是由于恢复出的图中具有更多的细节, 而原图像中没有。因此方法具有一定的局限作用, 与主观的感受不太一致。

第 3 个角度基于图像对比度, 衡量图像去雾前后的对比度的变化。采用的是复原后的新增可见边之比 ( $e$ ), 可见边的规范化梯度均值 ( $\bar{r}$ ), 饱和白色或黑色像素点的百分比 ( $\sigma$ ) 3 个指标。 $e$  表示的是去雾处

理后的可见边数量的变化， $\bar{r}$ 表示的是去雾处理后可见边质量的变化， $\sigma$ 表示的是去雾处理后白色或黑色像素的数量变化，当图像中全黑或者全白的像素越多时，会造成图像的对比度越低。这个评测角度能够有效地检验去雾算法，提高图像局部对比度的能力<sup>[19]</sup>。

由于各个算法在编码优化程度的不同，具体算法的计算用时不好比较，但是由于几种算法的复杂度不

同，计算速度也在不同的量级，KIM 基于对比度优化的算法和本文使用的去雾算法对于  $1080 \times 1920$  的灰度图像处理时间大概在 80 ms 左右，而 HE 算法则在几秒钟。在这个方法中  $e$  和  $\bar{r}$  值越大， $\sigma$  值越小，表明图像去雾的效果越好。从表 1 中知道，我们的方法效果更好，和主观的感受大体一致。

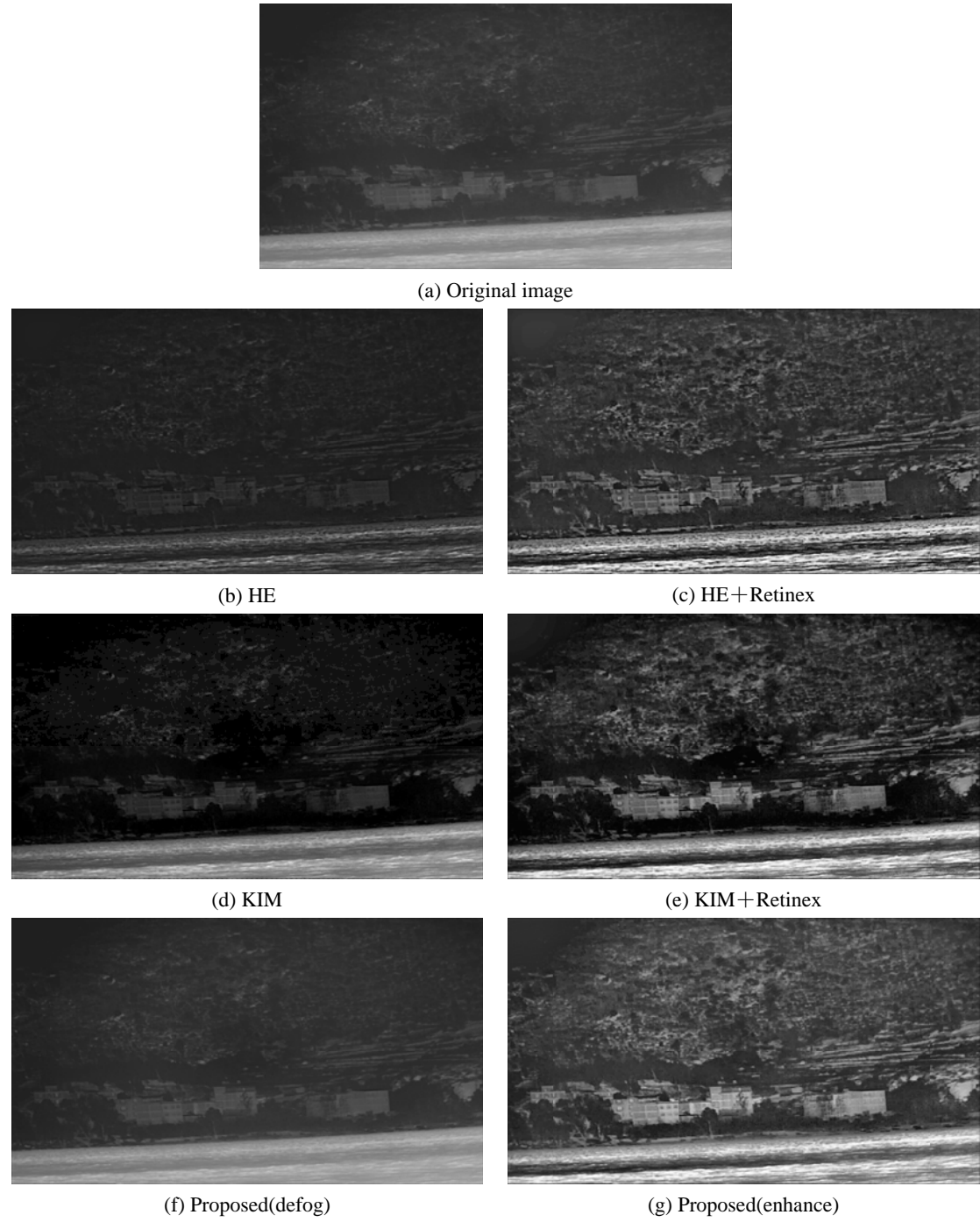


图 8 不同去雾处算法理结果

Fig.8 Processing results of different defogging algorithms



表1 去雾效果评价指标

Table 1 Defogging results evaluation index							
Defogging algorithm	MSE	PSNR/dB	SSIM/%	$e$	$\sigma$	$\bar{r}$	Number of visible edges
Original image	-	-	-	-	-	-	114998
HE	231.6701	16.0142	0.8336	3.4908	$1.784 \times 10^{-4}$	1.5565	516437
HE+Retinex	60.5245	17.3297	0.6378	6.2909	$2.211 \times 10^{-4}$	4.6765	838435
KIM	247.7749	17.1725	0.6116	7.1239	$1.412 \times 10^{-4}$	2.0885	714235
KIM+Retinex	141.9654	18.4024	0.5417	7.0031	$1.929 \times 10^{-4}$	4.1169	923840
Proposed(defog)	30.3697	17.3064	0.8838	0.5073	$9.645 \times 10^{-4}$	1.0797	173375
Proposed(enhance)	25.1906	18.9561	0.6342	7.1537	0	4.3066	937655

5 结论

本文针对红外图像在雾天条件下，图像质量下降，细节模糊不清，分辨率低等特点，提出了一种基于大气散射模型和 Retinex 红外图像去雾算法。利用大气散射模型，适当的简化改进算法，优化参数，在图像的质量和去雾处理时间找到平衡点。为后期的嵌入式平台实现实时的视频去雾打下基础。而针对去雾后的图像具有的对比度低的特点，采用 Retinex 算法增强，提升了图像的对比度和亮度。经过处理后的图像增强效果自然，细节丰富，获得了较好的视觉效果。

对经过不同去雾算法处理后的红外图像进行去雾效果评价，本文算法在处理时间和处理效果上都有一定的优势，对于雾天红外图像的复原增强有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势[J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311-318.  
CHEN Qian. Status and development trend of infrared image processing technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 311-318.

[2] 金伟其, 刘斌, 范永杰, 等. 红外图像细节增强技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2521-2527.  
JIN Weiqi, LIU Bin, FAN Yongjie, et al. Research progress of infrared image detail enhancement technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2521-2527.

[3] 李毅, 张云峰, 张强, 等. 基于去雾模型的红外图像对比度增强[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 298-306.

LI Yi, ZHANG Yunfeng, ZHANG Qiang, et al. Contrast enhancement of infrared image based on defogging model[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 298-306.

[4] McCartney E J. Scattering phenomena(Book Reviews: Optics of the Atmosphere, Scattering by Molecules and Particles)[J]. *Science*, 1977, 196: 1084-1085.

[5] 周国辉, 刘湘伟, 徐记伟. 一种计算红外辐射大气透过率的数学模型[J]. 红外技术, 2008, 30(6): 331-334.  
ZHOU Guohui, LIU Xiangwei, XU Jiwei. A mathematical model for calculating the atmospheric transmittance of infrared radiation[J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 331-334.

[6] 曹慧, 张宝辉, 陈磊, 等. 基于伪暗原色的红外增强技术研究[J]. 红外技术, 2016, 38(6): 476-480.  
CAO Hui, ZHANG Baohui, CHEN Lei, et al. Research on infrared enhancement technology based on pseudo dark primary color[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(6): 476-480.

[7] Narasimhan S G, Nayar S K.Removing weather affects from monochrome images[C]//*Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001:186-193.

[8] Tan K K, Oakley J P. Physics-based approach to color image enhancement in poor visibility conditions[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2001, 18(10): 2460-2467.

[9] Kim Jinhwan, JANG Wondong, Sim Jaeyoung. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 24(3): 410-425.

[10] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaou. Single image haze removal using dark channel prior[C]//*Proceedings of IEEE Conference on*

- Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1956-1963.
- [11] 刘倩, 陈茂银, 周东华. 基于单幅图像的快速去雾算法[C]//第 25 届中国控制与决策会议, 2013: 3780-3785.
- LIU Qian, CHEN Maoyin, ZHOU Donghua. Fast dehazing algorithm based on single image[C]//*The 25th China Control and Decision Conference*, 2013: 3780-3785.
- [12] Land E, McCann J J. Lightness and retinex theory[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, **61**(1): 1-11.
- [13] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 1997(6): 451-462.
- [14] Barnard K, Funt B. Investigations into Multi-Scale Retinex[C]//*Proc. of Colour Imaging in Multimedia*, 1998: 9-17..
- [15] 嵇晓强. 图像快速去雾与清晰度恢复技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- YAN Xiaoqiang. Research on image fast dehazing and sharpness restoration technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2012.
- [16] 李大鹏, 禹晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法[J]. *中国图象图形学报*, 2011, **16**(9): 1753-1757.
- LI Dapeng, YU Jing, XIAO Chuangbai. Non-reference objective quality evaluation method for image dehazing[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2011, **16**(9): 1753-1757.
- [17] 吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. *自动化学报*, 2015, **41**(2): 221-239.
- WU Di, ZHU Qingsong. Recent progress in image dehazing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(2): 221-239.
- [18] WANG Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, **13**(4): 600-612.
- [19] Hautiere N, Tarel J-p, Aubert D, et al. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis & Stereology Journal*, 2008, **27**(2): 87-95.