

# 气体泄漏红外图像动态压缩及增强方法

李家琨<sup>1,2</sup>, 金伟其<sup>1\*</sup>, 张 旭<sup>1</sup>, 金明磊<sup>1</sup>, 范永杰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

<sup>2</sup>北京交通大学理学院发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 气体泄漏红外成像探测具有高效率、远距离等显著优势。为了进一步增强观察人员对气体泄漏红外图像的细节感知, 等效提高系统探测极限, 提出一种基于双边滤波的气体泄漏红外图像动态压缩及增强方法, 以气体泄漏红外图像特点为依据, 对双边滤波和压缩合并过程进行控制, 实现了气体泄漏红外图像细节的有效增强。实验表明, 在实现从高位宽原始数据到低位宽输出显示数据压缩的同时, 气体泄漏痕迹信息得到显著增强, 且整幅图像具有较好的对比度, “光晕”现象得到有效抑制。

**关键词** 成像系统; 红外成像; 气体泄漏探测; 图像压缩与增强; 双边滤波

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0111003

## Gas Leak Infrared Image Dynamic Compression and Enhancement Method

Li Jiakun<sup>1,2</sup>, Jin Weiqi<sup>1</sup>, Zhang Xu<sup>1</sup>, Jin Minglei<sup>1</sup>, Fan Yongjie<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System of the Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of the Ministry of Education, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** As the gas leak infrared imaging detection technology has significant advantages of high efficiency and remote imaging detection, in order to enhance the detail perception of observers and equivalently improve the detection limit, a novel gas leak infrared image compression and enhancement method based on bilateral filtering is proposed. The method controls the process of the bilateral filtering, compressing and enhancing according to the characteristics of the gas leak infrared image. The experimental results demonstrate that the trace of gas leak is enhanced significantly, the contrast of the entire image is appropriate, and the halo effect is suppressed effectively.

**Key words** imaging systems; infrared imaging; gas leak detection; image compression and enhancement; bilateral filtering

**OCIS codes** 110.3080; 010.1120; 100.2000; 280.1120

## 1 引 言

红外焦平面的气体泄漏热成像检测技术高探测效率、远距离检测以及动态图像直观显示等特点使其成为当前国内外迅速发展的气体泄漏检测重要手段之一<sup>[1]</sup>。然而, 现有产品大多采用定制的制冷型红外焦平面探测器, 其成像波段范围往往局限于中波或长波<sup>[1]</sup>, 单一系统难以有效覆盖常见的工业有害气体, 且价格昂贵, 使得应用推广受到限制。近年来, 非制冷红外焦平面探测器技术发展迅速, 其灵敏度也得到迅速提高, 价格不断下降, 不仅在传统军用领域, 而且在民用领域的应用也得到迅速扩展。由于非制冷红外焦平面探测

**收稿日期:** 2016-06-29; **收到修改稿日期:** 2016-08-02

**基金项目:** 北京市自然科学基金重点项目(4121002)

**作者简介:** 李家琨(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测和红外图像处理等方面的研究。

E-mail: jkli@bjtu.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: mail:jinwq@bit.edu.cn

器属于热电探测器,理论上具有包含中波和长波的宽波段红外成像探测,若采用单一非制冷焦平面探测器进行危险气体泄漏成像检测,可明显降低系统成本。因此,法国 ULIS 公司 2012 年推出了 3~12  $\mu\text{m}$  宽波段响应的多晶硅非制冷红外焦平面探测器,法国 Bertin 公司推出了基于非制冷焦平面探测器的 Second Sight 系列气体检测热像仪<sup>[2-3]</sup>;北京理工大学李家琨等<sup>[4-5]</sup>也于 2012 年研制出国产的 3~12  $\mu\text{m}$  宽波段响应的氧化钒非制冷红外焦平面探测器,并由此开展了气体泄漏热成像检测理论和方法的研究,展现出广泛的应用推广前景。然而,相比于制冷型探测器,非制冷焦平面探测器灵敏度有一定差距,需要在红外成像模式、光学系统及信号处理等方面采用特殊的设计和方法。

目前,为了兼顾场景的动态范围和探测的温度分辨率,一般都采用 14 bit 或更高精度的模-数(A/D)转换器对红外焦平面探测器的输出信号进行采样和量化,但由于人眼所能同时分辨的灰度级别有限(约 50 个灰度级)<sup>[6]</sup>,在后续处理、显示和存储中为了压缩图像数据量并减小处理量,往往需要将图像灰度压缩到 8 bit。因此,从高位宽原始数据到低位宽输出显示数据的过程存在图像处理技术的发挥空间。目前国际上已有双边滤波(BF)、数字细节增强(DDE)等一些有效的处理方法,但算法应用往往需要结合检测对象特点更能发挥明显的作用。本文针对有效提取和增强气体泄漏微弱痕迹细节信号的需要,研究一种基于双边滤波的气体红外图像动态压缩及增强(BF&GICE)方法,以期在完成图像灰度等级压缩的同时,保留甚至增强观察人员对气体泄漏图像细节的感知。

## 2 双边滤波算法及 BF&GICE 算法

常见能够实现硬件实时处理的红外图像动态范围压缩及细节增强方法主要是自动增益控制(AGC)和基于直方图均衡(HE)的方法。相比于 AGC 方法,基于 HE 的方法能够更好的保留和增强图像细节信息,但普通 HE 容易存在主要灰度级过度增强、噪声水平增大、细节信息部分丢失以及在灰度平坦区域的冲蚀效应等问题。为此,人们研究提出了全局直方图均衡化<sup>[7]</sup>、基于局部处理的自适应直方图均衡化<sup>[8]</sup>、平台直方图均衡化<sup>[9]</sup>、对比度受限自适应直方图均衡化<sup>[10]</sup>和局部交叠子块直方图均衡化<sup>[11]</sup>等多种基于 HE 的方法,但这些方法依然主要聚焦于图像的直方图信息,对图像数据的具体细节信息缺少足够的挖掘手段。

近些年,研究者相继提出了一些对图像细节信息控制性更强的非线性高动态范围压缩和细节增强方法,包括非锐化掩模方法<sup>[6]</sup>、基于非线性各向异性扩散的方法<sup>[12]</sup>、基于 Retinex 理论的细节增强方法<sup>[13-14]</sup>、基于双边滤波的方法<sup>[15-16]</sup>以及其他压缩和细节增强方法<sup>[17]</sup>等。其中由 Branchitta 等<sup>[16]</sup>提出的双边滤波及动态范围分离(BF&DRP)方法和美国 FLIR 系统公司广泛预装于其热成像系统产品中的数字细节增强(DDE)方法<sup>[17]</sup>特别引人关注。这两种方法都能在完成高动态范围压缩的同时,很好地保持甚至增强图像中的细节信息,但算法尚属于红外图像处理的通用方法,并没有针对气体泄漏红外图像的特殊处理,其对于某些成像场景的“光晕”现象依然明显。

对于气体泄漏的红外成像探测,往往由于气体泄漏量较小,气体红外吸收较弱以及气体泄漏后与周围环境热交换迅速等原因,气体云团与图像背景灰度接近且形状不规则,所占灰度级较少,与图像背景的对比度较低,目前已有方法往往存在室外气体泄漏红外图像的压缩和增强效果方面的缺陷。

### 2.1 双边滤波算法

双边滤波算法是一种由 Tomasi 等 1998 年提出的自适应图像滤波算法,具有保留图像边缘,减少图像噪声的优点,其典型滤波函数可表示为

$$f_{\text{BF}}(i, j) = k^{-1}(i, j) \sum_{(\zeta, \xi) \in \omega} g_1(|f(\zeta, \xi) - f(i, j)|, \mu, \sigma) g_2\{D[(\zeta, \xi), (i, j)], \mu, \sigma\} f(i, j), \quad (1)$$

$$k(i, j) = \sum_{(\zeta, \xi) \in \omega} g_1(|f(\zeta, \xi) - f(i, j)|, \mu, \sigma) g_2\{D[(\zeta, \xi), (i, j)], \mu, \sigma\}, \quad (2)$$

式中  $f(i, j)$  表示源图像滑动子窗口  $\omega$  中心像素灰度值;  $f_{\text{BF}}(i, j)$  表示双边滤波后灰度值;  $f(\zeta, \xi)$  表示  $\omega$  子窗口内除了中心像素的其他位置的像素灰度值;  $g_1$  表示灰度域滤波函数;  $g_2$  表示空域滤波函数;  $D[(\zeta, \xi), (i, j)]$  表示  $\omega$  子窗口内中心像素与其他位置像素的距离。

滤波函数  $g_1$  和  $g_2$  一般采用高斯函数的形式,即

$$g(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

式中  $\mu$  和  $\sigma$  分别为高斯函数的位置参数和尺度参数,是决定高斯函数分布的关键参数,其数值的选取对滤波效果的好坏至关重要。

可以看出,BF 算法属于低通滤波函数,与普通滤波算法的区别在于包含了灰度域和空域两种滤波函数,灰度域滤波函数对中心像素的作用是将中心像素与子窗口内周围像素的灰度值进行加权平均,权重随着周围像素灰度与中心像素灰度的差值增大而减小;空域滤波函数的加权平均运算权重随着周围像素与中心像素的空间距离加大而逐渐减小。二者的共同作用使得双边滤波算法能够在降低图像噪声的同时,很好地保持图像边缘信息。

## 2.2 基于双边滤波的 BF&GICE 算法

BF 算法虽然是一种可获得较好滤波效果的自适应算法,但算法处理量很大,难以适应实时成像处理的要求。Branchitta 等<sup>[16]</sup>将双边滤波应用于高动态红外成像系统的动态压缩和细节增强显示,提出了 BF&DRP 方法,取得了较为明显的效果。之后 FLIR 公司的 DDE 算法以及国内多家单位研究的增强算法<sup>[18-19]</sup>也大多基于 BF 思想,只是不同算法采用了各自独特的自适应处理过程。

针对气体泄漏红外热成像提出的 BF&GICE 算法流程(图 1)采用了 BF&DRP 方法类似的处理框架,高动态范围(14 bit)的气体泄漏红外图像  $f(i, j)$  经过双边滤波处理后得到基图像  $f_{BF}(i, j)$ ,并通过输入源图像与基图像的差分运算得到细节图像  $f_{DT}(i, j)$ ,即

$$f_{DT}(i, j) = f(i, j) - f_{BF}(i, j). \quad (4)$$

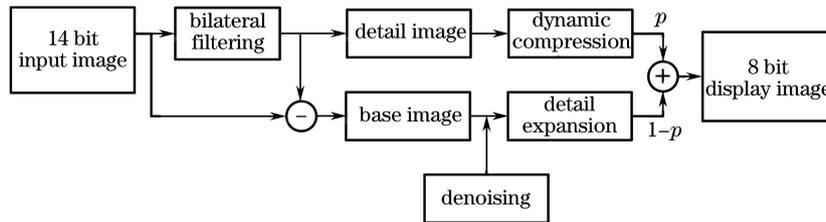


图 1 BF&GICE 方法的基本处理流程图

Fig. 1 Basic processing flow chart of BF&GICE method

由于基图像和细节图像的性质完全不同,需要对二者进行不同的处理。基图像主要包含对比度大、灰度变化明显的基本信息,如天空背景、地面背景和场景中面积较大的物体等,算法处理的主要目的是动态压缩,减少其灰度占比,记为操作符  $\lfloor \cdot \rfloor_{cp}$ ;细节图像主要包含对比度小、灰度变化较弱的细节信息,气体泄漏的痕迹往往隐藏在细节信息中,因此,算法的主要目的是使细节膨胀,增加其灰度占比,提高人眼对气体泄漏痕迹的判读能力,记为操作符  $\lfloor \cdot \rfloor_{ep}$ ;动态压缩和细节膨胀过程还需完成基图像和细节图像从 14 bit 到 8 bit 的位数压缩;最后,将动态压缩的基图像和细节膨胀的细节图像进行线性组合(组合参量  $p$ ),合成为输出显示图像

$$f_{OUT}(i, j) = p \cdot \lfloor f_{BF}(i, j) \rfloor_{cp} + (1 - p) \cdot \lfloor f_{DT}(i, j) \rfloor_{ep}. \quad (5)$$

虽然 BF&GICE 方法采用了类似 BF&DRP 方法的处理框架,但针对气体泄漏红外图像的细节增强处理,采用了以下针对性的处理方法。

### 1) 滤波函数的特征控制

由于少量气体泄漏后,气体将在较短时间内与周围空气完成大部分热交换过程,且气体的红外吸收弱于一般场景辐射,因此,气体泄漏云团在红外图像中呈现为灰度与背景灰度相近的不规则形状,气体云团目标的灰度占比很小,与背景对比度较低,属于较弱的细节信息,需要在双边滤波时尽可能地分离到细节图像中,并通过细节膨胀得到增强。

将气体云团分离到细节图像需要双边滤波函数(无论是灰度域还是空域)在气体云团灰度附近具有更强的滤波效果,以减小基图像中的气体云团信息,而在其他灰度区间保持原滤波特征。为此,在原灰度域和空域滤波函数中加入一个控制参数  $\epsilon$ ,其解析式设计为

$$\epsilon(x) = \begin{cases} -\alpha \exp(-\beta x^2) + \gamma, & \epsilon > 0.01 \\ 0.01, & \epsilon \leq 0.01 \end{cases}, \quad (6)$$

$$x = \begin{cases} \frac{f(i,j) - \text{mean}[f(i,j)]}{\max[f(i,j)] - \text{mean}[f(i,j)]}, & f(i,j) > \text{mean}[f(i,j)] \\ \frac{\text{mean}[f(i,j)] - f(i,j)}{\min[f(i,j)] - \text{mean}[f(i,j)]}, & f(i,j) \leq \text{mean}[f(i,j)] \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $\max[f(i,j)]$ 、 $\min[f(i,j)]$  和  $\text{mean}[f(i,j)]$  分别表示图像像素灰度的最大值、最小值和平均值;  $x$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ;  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  决定了  $\epsilon$  的曲线性质, 根据实验所获得的经验数值为 2, 20 和 1。加入控制参数  $\epsilon$  的滤波函数形式为

$$g(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\epsilon(x) \frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (8)$$

由图 2 的  $\epsilon(x)$  曲线和(8)式可知, 滤波函数在图像均值附近约 20% 灰度级范围内的滤波特征被显著加强, 使得处于均值附近的气体泄漏云团信息更多地被分离到细节图像中。

### 2) 自适应滤波窗口选择

双边滤波算法滑动子窗口  $w$  的窗口尺寸是影响滤波效果的重要参数, 尺寸较小时, 参与改变中心像素灰度值的像素数很少, 滤波效果弱, 反之, 滤波效果增强<sup>[9]</sup>。气体云团与背景的低对比度特性使得无论云团内部还是边缘的灰度值波动都弱于场景中其他物体, 因此, 可利用这一特征对滑动子窗口  $w$  的尺寸进行自适应选择, 设计窗口尺寸控制参数  $\delta(F)$ , 则滤波函数由  $g$  变为  $\delta(F) \cdot g$ 。  $F$  代表窗口内图像灰度的波动强度阈值, 其具体形式可以是窗口图像的标准差或信息熵等。

在控制参数  $\delta(F)$  的作用下, 滑动子窗口  $w$  的尺寸将随着波动强度的增大而减小, 如从  $9 \times 9$  缩小至  $3 \times 3$ , 使气体云团等灰度变化平缓区域滤波较强, 加强气体泄漏云团信息向细节图像的分离, 而在一般场景物体边缘等灰度波动剧烈区域滤波较弱, 强对比边缘信息被分离到基图像中完成压缩。必须强调, 自适应的滤波窗口选择技术的另一个重要作用是对“光晕”现象的抑制效果显著, 这一点将在下一节的处理结果中对比说明。

### 3) 细节图像的二次滤波

由特点 1) 和 2) 以及(4)式的差分运算原理, 输入图像灰度均值附近平坦区域的微弱噪声被大量分离到细节图像中, 如果不进行处理, 这些原本微弱的噪声会随着针对气体泄漏云团的细节膨胀过程被明显放大, 严重影响结果图像的质量。对细节图像进行二次滤波是降低输出图像噪声, 改善图像质量的有效措施。

### 4) 符合人眼视觉特性的图像压缩与合成

现有显示设备输出显示的是 8 bit 灰度图像, 其灰度值范围为 0~255。由人眼对灰度的分辨率曲线(图 3)可知, 在图像灰度很高或很低的情况下, 人眼的灰度分辨率低; 而在图像灰度适中的情况下, 人眼的分辨率高, 在 32~192 灰度级之间, 基本可分辨出 2 个灰度级的差别。另外, 实验发现当灰度级差别大到一定程度时, 人眼可以很容易地将其分辨出来, 再加大灰度级间隔对于提高人眼分辨能力意义不大, 反而会压缩其他灰度级的间隔, 使图像整体质量下降。

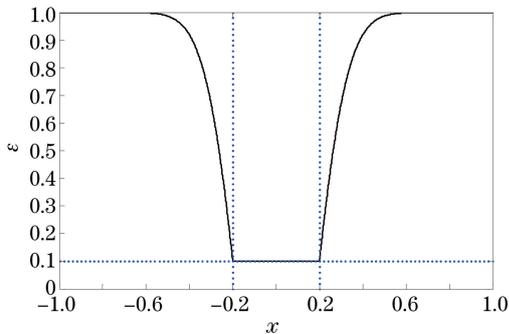


图 2  $\epsilon(x)$  曲线  
Fig. 2  $\epsilon(x)$  curve

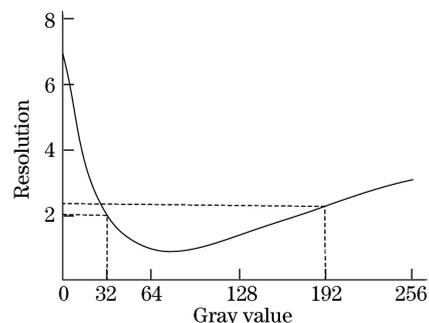


图 3 人眼的灰度分辨率曲线  
Fig. 3 Resolution curve of human eyes for gray scale

在基图像和细节图像的压缩与合并过程中,根据人眼的视觉特性采用了以下措施:1)对于气体泄漏的红外图像,灰度值极高或极低的少量像素点一般是噪声或盲元,通过截断上下界一定比例(如1%)异常点的方式予以剔除,可避免过大的灰度级间隔;2)基图像的灰度级差异大,且主要是场景信息,可用 $\gamma$ 曲线进行动态压缩[图4(a)];气体云团与图像背景的灰度级差异小,可用 $\gamma$ 曲线对细节图像进行膨胀拉伸[图4(b)];3)在基图像和细节图像合成之前,调整图像均值位于人眼灰度分辨力较强的区域,如128灰度级附近,使气体云团在易分辨的灰度级区域完成合成,提高人眼对气体的识别能力;4)合成比例 $p$ 越小,合成输出图像的气体信息越明显,但图像颗粒感增强,人眼观察的舒适度下降,反之则舒适度上升。一般 $p$ 的数值为0.5~0.7较为合适。

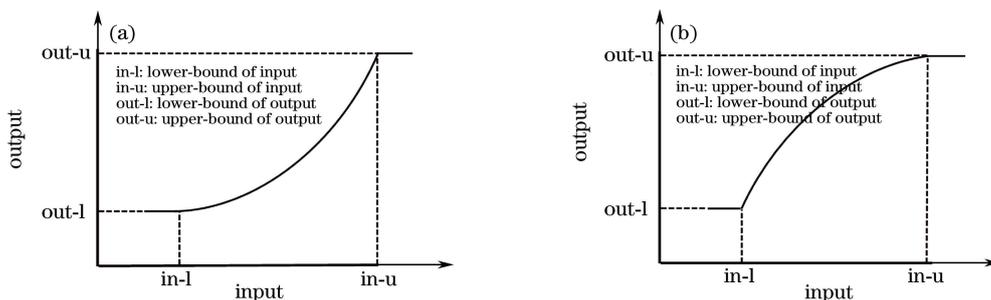


图4 (a) 基图像的压缩曲线和(b) 细节图像的膨胀曲线

Fig. 4 (a) Compression curve of the base image and (b) expansion curve of the detail image

### 3 实际气体泄漏红外图像的增强处理结果

采用非制冷红外焦平面热成像系统(国产氧化钒  $VO_x$  非制冷焦平面探测器,噪声等效温差为40 mK,相应波段 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ,分辨率 $320\times 240$ )采集并处理了多种有害气体泄漏的图像,这里给出乙烯( $C_2H_4$ )气体泄漏的图像并进行分析。热成像系统直接输出显示的8 bit数据普遍采用AGC法[图5(a)]或HE法[图5(b)],简单的AGC法使得气体云团信息被削弱(图中下方箭头所指位置),整个图像的对比度不高,细节不明显(如图左上方和右上方箭头所指位置);HE法虽然提高了图像对比度,但气体云团信息和图像细节仍然损失严重。BF&DRP法[图5(c)]和BF&GICE法[图5(d)]不仅使图像对比度得到大大改善,而且气体云团信息和图像细节得到很好的保留并显著增强。

相比于BF&DRP方法[图5(c)],BF&GICE方法的优势在于:1)对气体云团的增强效果更加明显[图

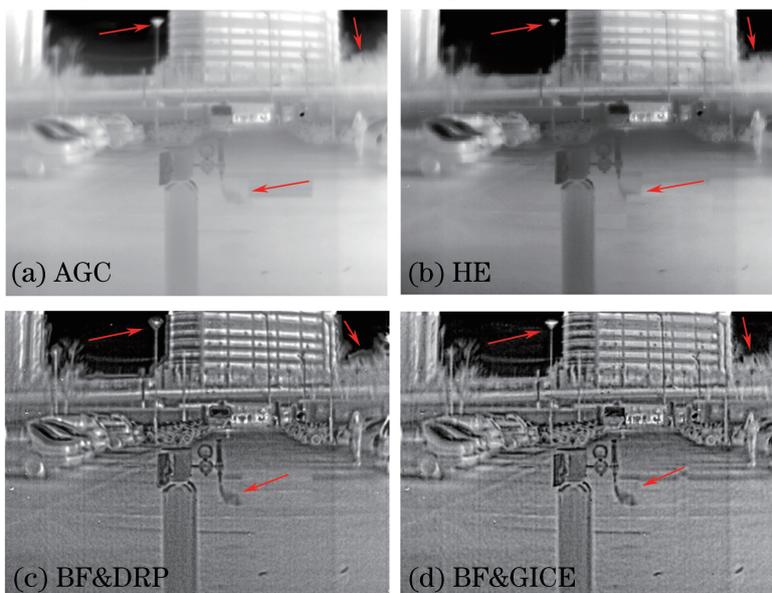


图5 不同算法对乙烯气体泄漏非制冷热成像图像的增强效果比较

Fig. 5 Comparison of different algorithms for the gas (ethylene) leak uncooled thermal images

5(d)下方箭头所指位置];2) 消除了图像细节增强后边缘产生的“光晕”现象[图 5(d)左上方和右上方箭头所指位置]。图 6 给出了 BF&GICE 方法对气体泄漏红外图像增强中间过程的基图像数据和细节图像数据的压缩显示结果。

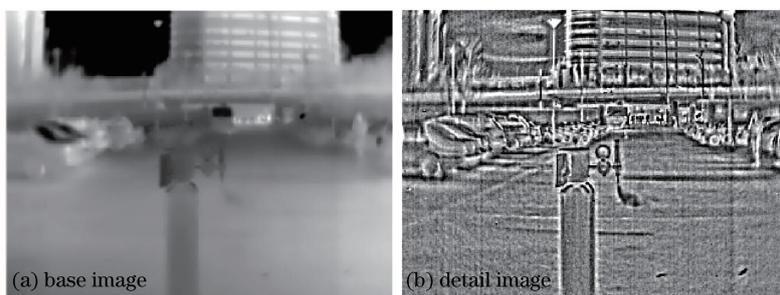


图 6 BF&GICE 法在气体泄漏图像增强过程中的基图像和细节图像

Fig. 6 (a) Base image and (b) detail image of the BF&GICE method in the process of gas leak image enhancement

综上所述,BF&GICE 算法可获得气体泄漏云团更加清晰,图像整体对比度较好,“光晕”现象和图像噪声得到有效抑制的 8 bit 输出显示图像。

## 4 结 论

非制冷红外焦平面探测器用于工业有害气体泄漏检测具有广泛的应用前景。在总结分析现有红外图像动态压缩与增强算法优缺点的基础上,针对气体泄漏红外图像特点,提出了一种基于双边滤波的气体红外图像动态压缩及增强的改进方法,详细阐述了其基本原理和特点。相对常规的 AGC 和 BF&DRP 方法,BF&GICE 方法可在有效抑制“光晕”现象的同时,有效突出红外图像中气体泄漏痕迹。

目前,已初步完成了 BF&GICE 方法在以 Xilinx Virtex-5 芯片为核心的现场可编程门阵列高速视频硬件处理平台上的实时运行,处理延时小于 10 ms,泄漏气体痕迹的增强效果明显。通过对算法的进一步优化,降低硬件资源消耗,有望直接集成于现有红外成像系统的视频处理模块中,降低应用推广成本,加快 BF&GICE 方法在气体泄漏红外成像探测领域的实际应用。

## 参 考 文 献

- [1] Li Jiakun, Jin Weiqi, Wang Xia, *et al.* Review of gas leak infrared imaging detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 513-520.  
李家琨, 金伟其, 王 霞, 等. 气体泄漏红外成像检测技术发展综述[J]. *红外技术*, 2014, 36(7): 513-520.
- [2] Naranjo E, Baliga S, Bernascolle P. IR gas imaging in an industrial setting[C]. SPIE, 7661: 76610K.
- [3] General Monitors. Improving plant safety through IR gas cloud imaging[EB/OL]. (2015-02-05)[2016-06-20]. [http://www.second-sight-gasdetection.com/resources/fichiers/second\\_sight/ir\\_gas\\_cloud\\_imaging\\_white\\_paper\\_v05.pdf](http://www.second-sight-gasdetection.com/resources/fichiers/second_sight/ir_gas_cloud_imaging_white_paper_v05.pdf).
- [4] Li Jiakun, Dun Xiong, Jin Minglei, *et al.* Design of wide-band gas leak infrared imaging detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1966-1971.  
李家琨, 顿 雄, 金明磊, 等. 宽波段气体泄漏红外成像检测系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1966-1971.
- [5] Li J K, Jin W Q, Wang X, *et al.* MRGC performance evaluation model of gas leak infrared imaging detection system [J]. *Optics Express*, 2014, 22(S7): A1701-A1712.
- [6] Gonzalez R C, Woods R E. *Digital image processing*[M]. 3<sup>th</sup> edition. New Jersey: Prentice Hall, 2008: 37-38.
- [7] Polesel A, Ramponi G V, Mathews V J. Image enhancement via adaptive unsharp masking[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 9(3): 505-510.
- [8] Kokufuta K, Maruyama T. Real-time processing of local contrast enhancement on FPGA[C]. *International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, 2009: 288-293.
- [9] Virgil E V. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(7): 1921-1926.
- [10] Lu C H, Hsu H Y, Wang L. A new contrast enhancement technique by adaptively increasing the value of histogram

- [C]. International Workshop on Imaging Systems and Techniques, 2009: 407-411.
- [11] Kim J Y, Kim L S, Hwang S H. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(4): 475-484.
- [12] Tumblin J, Turk G. LCIS: a boundary hierarchy for detail preserving contrast reduction[C]. Proceedings of the 26<sup>th</sup> Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1999: 83-90.
- [13] Wen Haibin, Bi Duyan, Ma Shiping, *et al.* Variational retinex algorithm for infrared image enhancement with staircase effect suppression and detail enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911005.  
温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除阶梯效应与增强细节的变分 Retinex 红外图像增强算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911005.
- [14] Li Yi, Zhang Yunfeng, Li Ning, *et al.* Adaptive detail enhancement for infrared image based on subband-decomposed multi-scale retinex[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0512001.  
李 毅, 张云峰, 李 宁, 等. 基于子带分解多尺度 Retinex 的红外图像自适应细节增强[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0512001.
- [15] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. 6<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision, 1998: 839-846.
- [16] Branchitta F, Diani M, Corsini G, *et al.* New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. Optical Engineering, 2009, 48(9): 096401.
- [17] Högasten N, Lindner R. Digital image detail enhancement (DDE)[EB/OL]. [2016-06-01] [www.flir.com/MMC/CVS/Tech\\_Notes/TN\\_0003\\_EN.pdf](http://www.flir.com/MMC/CVS/Tech_Notes/TN_0003_EN.pdf).
- [18] Fan Yongjie, Jin Weiqi, Liu Chongliang, *et al.* IRFPA image detail enhancement and dynamic compression technique based on FPGA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11): 3113-3118.  
范永杰, 金伟其, 刘崇亮, 等. 基于 FPGA 的 IRFPA 图像细节增强与动态压缩处理技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 3113-3117.
- [19] Zuo C, Chen Q, Liu N, *et al.* Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 127401.