

用于增强可视性的高动态范围红外图像融合

王 宇¹, 谢育林²

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 国家电网宜昌供电公司, 湖北宜昌 443300)

摘要: 针对高动态范围(14 bit)红外图像融合后并不能直接用于显示的问题, 设计了一种用于增强红外图像可视性的融合框架。利用数字全变分滤波器对图像分层处理, 然后对每一层进行动态范围压缩, 自适应的合成低动态范围图像(8 bit), 再通过传统融合算法进行融合, 得到可视性增强的低动态范围融合图像。实验结果表明, 相较于目前已有的方法, 该框架融合得到的信息量大, 在增强对比度的同时能有效抑制噪声, 明显改善融合图像的视觉效果。

关键词: 高动态范围; 数字全变分滤波器; 可视性; 图像融合

中图分类号: TP732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2014)05-0365-07

High Dynamic Range IR Image Fusion for Enhancing Visibility

WANG Yu¹, XIE Yu-lin²

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. State Grid Hubei Yidu Electric Power Supply Company, Yidu Hubei 443300, China)

Abstract: Aiming at the problem that high dynamic range(14 bit) IR image cannot directly be used for displaying, a new fusion framework for enhancing visibility is proposed. Firstly the original image is separated into base-layer and detail-layer by digital total variation filter, then dynamic range is compressed and every single layer are recombined adaptively into low dynamic range(8 bit) IR image. Finally, through conventional fusion methods, image with enhanced visibility is obtained. Experimental results show that compared with the existing methods, the new approach can get more amount of information, effectively suppress noise with contrast-enhanced, and greatly improve the visual effect of fusion image.

Key words: high dynamic range, digital total variation filter, visibility, image fusion

0 引言

红外成像系统受大气环境影响较大, 比如雾霾、雨天等大气环境会严重影响系统作用距离, 降低成像质量, 甚至可能由于大气对单一波段红外辐射的强吸收, 导致目标丢失, 不能真实的反映场景信息。双波段红外图像融合能综合利用目标在不同频段的辐射特性, 融合得到较单波段信息更丰富的红外图像, 在战场态势感知等应用场合, 为观测者提供更全面客观的评判依据, 提高系统的整体性能。现在红外成像系统的量化精度基本都是 14 bit 或者更高, 但通用的显示设备大多只支持 8 bit 图像, 融合算法也很少有涉及高动态范围的红外图像, 因而研究高动态范围红外图像融合框架, 在获得较好融合效果的同时, 增强图像的显示效果, 有重要的实际意义。

目前增强红外图像可视性主要是通过增强图像对比度, 突出细节信息。常见的红外图像对比度增强方法主要分为两类, 一类是直方图增强方法, 例如全局直方图均衡化^[1]、基于局部处理的自适应直方图均衡化^[2]、平台直方图均衡化^[3]、对比度受限自适应直方图均衡化^[4-5]等。基于直方图处理的增强方法能在一定程度上改善红外图像的可视化效果, 但是由于只利用了直方图信息, 存在过度增强、噪声放大、容易产生光晕、细节丢失等问题。另一类方法是基于反锐化掩模(UnsharpMask, UM)技术的分层处理方法, 其主要思想是通过非线性滤波将图像分为基层和细节层, 分别进行处理, 再合成输出。比较典型的是基于双边滤波和动态范围压缩(BF&DRP)^[6-7]方法, 其利用双边滤波^[8]将 14 bit 的高动态范围图像分解成基层(base-layer)和细节层(detail-layer), 然后分别对

收稿日期: 2014-01-04; 修订日期: 2014-01-17.

作者简介: 王宇(1988-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 主要研究方向为红外图像处理, 图像融合等。E-mail: wangyucba@hotmail.com.

基金项目: 国家 863 计划资助项目, 基金号: 2011AA7031002G; 国家十二五国防预研项目, 基金号: 41101050501.

这两层图像做 gamma 校正, 并允许一定比例的像素饱和以进一步优化显示效果, 最后合成输出 8bit 图像。该方法能明显改善图像的显示效果, 但需要谨慎的设置双边滤波参数和图像合成的权重系数, 对于双波段图像融合往往需要分别设置, 而且这些参数都是全局性的, 对于噪声的抑制效果也不太理想。

针对上述问题, 本文设计了一种基于数字全变分滤波器^[9]的高动态范围红外图像融合框架, 利用数字全变分滤波器的迭代过程可以灵活的将图像分为一个基层和多个细节层, 对每一层动态范围压缩后再合成输出, 合成权重是基于局部梯度信息的, 在迭代过程中自动产生, 不需要人为设置, 这样就能够更细致的处理细节信息, 又由于全变分滤波器优异的降噪性能, 该框架对于噪声也有明显的抑制效果, 能够显著提高融合图像的可视性。

1 数字全变分滤波器

Tony.F Chan 等在 ROF 降噪模型^[10]的基础上提出了数字全变分滤波器, 并证明了该滤波器是 ROF 模型的等价数值求解格式^[11], 即数字全变分滤波器拥有与 ROF 降噪模型性能相当的降噪和边缘保持能力。对于任意像素节点 $\alpha \in \Omega$, 数字全变分滤波器可以表示为:

$$u_{\alpha} = F_{\alpha}(u) = h_{\alpha\alpha} \cdot u_{\alpha}^0 + \sum_{\beta \sim \alpha} h_{\alpha\beta} \cdot u_{\beta} \tag{1}$$

式中: $F_{\alpha}(u)$ 是滤波器的传递函数; $\beta \sim \alpha$ 表示 β 是 α 邻域像素点, $h_{\alpha\alpha}$ 和 $h_{\alpha\beta}$ 为滤波器系数, 取值在 0 到 1 之间, 可由下式计算:

$$h_{\alpha\alpha} = \frac{\lambda}{\lambda + \sum_{\gamma \sim \alpha} w_{\alpha\gamma}}, \quad h_{\alpha\beta} = \frac{w_{\alpha\beta}}{\lambda + \sum_{\gamma \sim \alpha} w_{\alpha\gamma}}$$
$$w_{\alpha\beta} = \frac{1}{|\nabla_{\alpha} u|_{\varepsilon}} + \frac{1}{|\nabla_{\beta} u|_{\varepsilon}}, \quad |\nabla_{\alpha} u|_{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{\beta \sim \alpha} (u_{\beta} - u_{\alpha})^2 + \varepsilon^2} \tag{2}$$

式中: λ 为拉格朗日乘子; $w_{\alpha\beta}$ 表示各邻域像素点的局部变分^[12], 为了避免分母为零, 引入一个很小的正数 ε , 一般取 $\varepsilon = 1e-4$ 。

分析式(1), 可以将数字全变分滤波器用下面示意图表示如图 1 所示。

可以看出, 像素点 u_{α} 的更新由两部分构成, 一部分由原始图像逼近, 使更新图像能保持原始图像信息, 另一部分由邻域像素加权逼近, 这部分对更新图像进行平滑, 有降噪的效果。滤波器系数与区域梯度能量相关, 当 $|\nabla_{\alpha} u|_{\varepsilon}$ 非常大时, 说明该区域有大的跳变,

或者说有边缘信息, 此时 $w_{\alpha\beta}$ 和 $h_{\alpha\beta}$ 的值会很小, 而 $h_{\alpha\alpha}$ 的值很大(接近于 1), 保持边缘信息占主导地位, 相反, 当 $|\nabla_{\alpha} u|_{\varepsilon}$ 比较小时, 可认为图像比较平坦, 此时 $h_{\alpha\beta}$ 的值较大, $h_{\alpha\alpha}$ 相对较小, 平滑作用占优势, 起到降噪的效果。数字全变分滤波器就是根据局部的梯度能量信息, 自适应的调整滤波器系数, 使得输出图像在降噪的同时能够保留边缘信息。

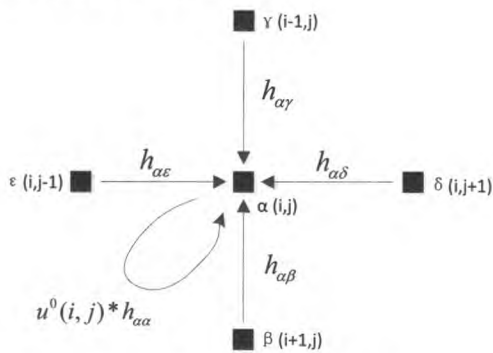


图 1 数字全变分滤波器图示

Fig.1 Illustration of digital TV filter

2 高动态范围图像融合框架

高动态范围图像含有更多的细节信息, 本文利用数字全变分滤波器的迭代过程对图像进行多尺度的细节分离, 然后分别压缩每一层图像的动态范围, 再对合成后的 8bit 图像进行融合, 融合流程如图 2 所示。

2.1 图像分层处理

数字全变分滤波器通过多次迭代实现图像降噪, 每一次迭代的输出都是上一次平滑与保真后的结果, 与原图像有相同的尺寸。利用这种迭代结构, 可以很方便的构建图像多尺度分离的框架。如图 2 所示, 假设迭代次数为 3, 第三次迭代的结果就是降噪之后的图像, 经过多次的平滑降噪, 作为基层 (base-layer) 图像, 而相邻两次的迭代结果相减可以提取出多尺度的细节层 (detail-layer) 图像, 这样原始图像就可以被分解成一个基层和三个细节层, 如图 3 所示。

随着迭代次数的增加, 原图像越来越多的细节被平滑掉, 最后得到的就是基层图, 其含有的噪声最少, 视觉效果上图像非常平滑。而对于细节层图像, 越是小尺度的细节, 其包含的噪声越大, 从图中也可以看出迭代次数越多, 其对应的细节层纹理也越粗。将图像分解为多个细节层, 更有利于灵活细腻的处理小尺度细节, 将不同尺度的细节分配不同的合成权重系数, 利用数字全变分滤波器的平滑特性抑制噪声放大。

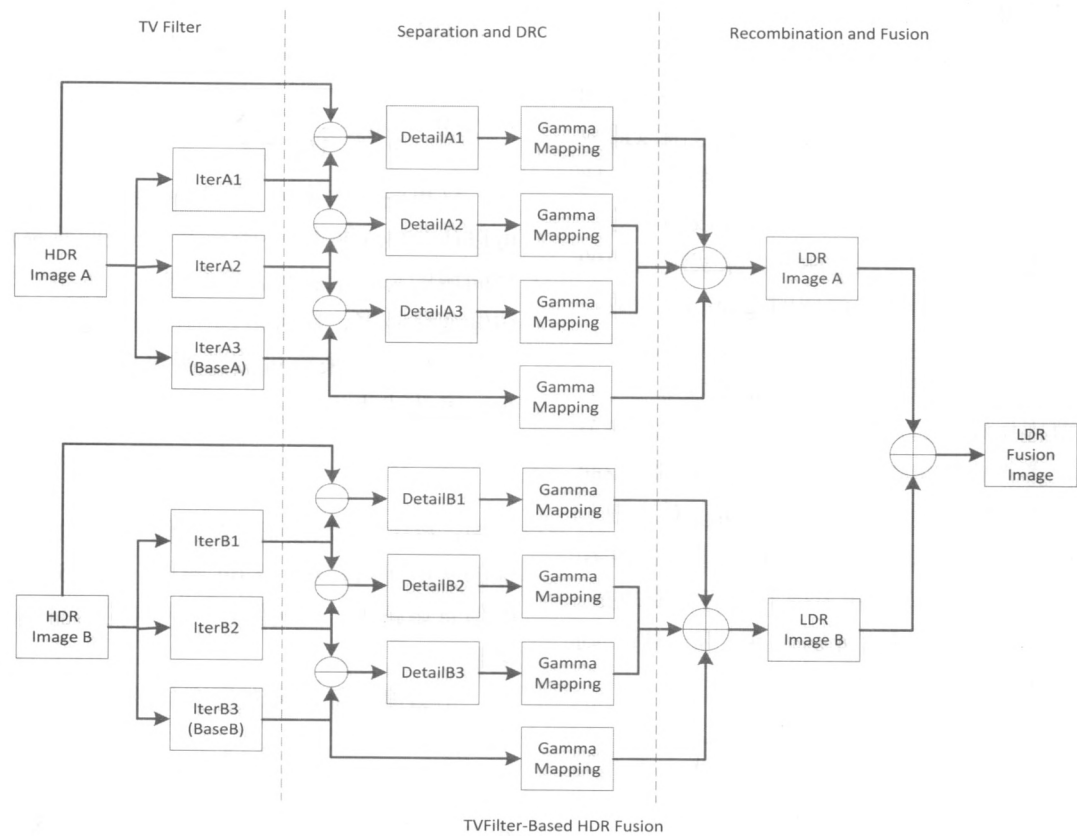


图 2 高动态范围图像融合流程图（TV&DRP Fusion） Fig.2 Pipeline of HDR fusion（TV&DRP Fusion）

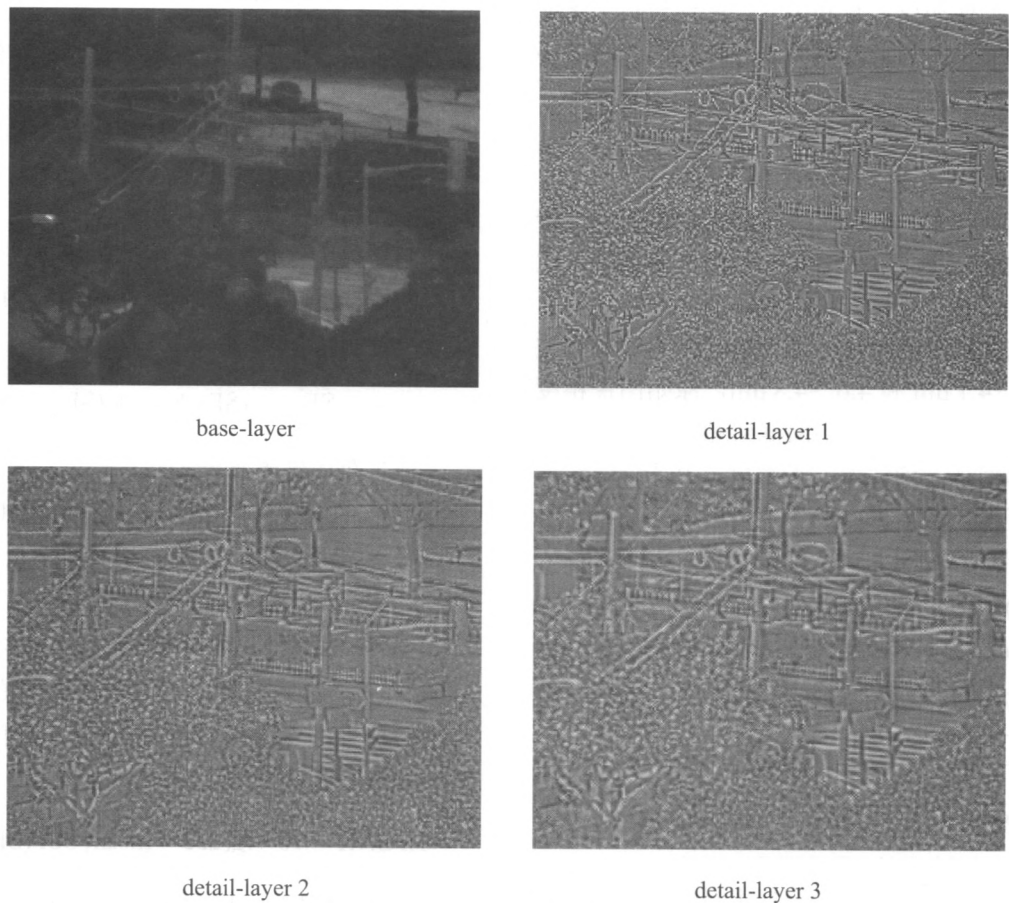


图 3 图像分层处理 Fig.3 Separation and layering

2.2 动态范围压缩与合成

将图像细节分离后,接下来就是对每一层进行动态范围压缩。图像动态范围压缩的目的是要将 14 bit 的高动态范围红外图像映射到 8 bit 动态范围以适应显示设备,通常可以采用非线性的映射函数实现,比如 gamma 函数^[13]、对数函数、S 形函数、分段函数等,也可以采用直方图方法构建映射函数,来实现图像的动态范围压缩。文中采用较为简便的 gamma 函数,同时借鉴文献[6]允许一定比例像素饱和的方法,进一步拉伸图像低端灰度,以得到更好的显示效果。

在动态范围压缩之后,需要将 8 bit 的基层和细节层重新合成。考查式(1)和(2)可知,拉格朗日乘子 λ 起着平衡降噪与保真的作用,滤波器系数 h_{aa} 对应细节层的权重,而其他四个系数对应基层的权重,因此在图像合成阶段,可以采用 h_{aa} 作为细节层的合成系数。记三次迭代的滤波器系数 h_{aa} 分别为 W_1, W_2, W_3 ,则合成图像可以表示为:

$$f_{\text{recombine}} = (1 - W_3) \cdot f_{\text{base}} + \frac{W_3}{(W_1 + W_2 + W_3)} \cdot [W_1 \cdot f_{\text{detail1}} + W_2 \cdot f_{\text{detail2}} + W_3 \cdot f_{\text{detail3}}] \quad (3)$$

式中: W_1, W_2, W_3 是与图像尺寸相同的系数矩阵,由局部梯度信息所决定,梯度能量越大,该像素点合成系数越大,为了使加权系数和为 1,对系数归一化处理,使所有细节层占的总权重为 W_1, W_2, W_3 ,则基层所占权重为 $(1 - W_3)$ 。

3 实验结果

下面通过对两组实际的高动态范围红外图像进行融合,并与文献[7]基于 BF&DRP 的融合框架进行比较,来说明本文基于 TV&DRP 融合框架的有效性。实验中采用滤光片得到双色中波图像,探测器响应波段分别为 3.7~4.1 μm 和 4.6~4.8 μm ,原始图像精度为 14 bit。为了客观的评价不同框架融合图像质量,本文采用空间频率、图像熵、平整度、基于 HVS 的峰值信噪比作为评价指标。

空间频率 (Spatial Frequency, SF)^[14]定义为:

$$\text{SF} = \sqrt{[(\text{RF})^2 + (\text{CF})^2 + (\text{MDF})^2 + (\text{SDF})^2] / (4 - 1)} \quad (4)$$

式中:RF 和 CF 表示行频率和列频率,MDF 和 SDF 表示主对角线方向和副对角线方向的频率,这 4 个频率由下列式子给出:

$$\text{RF} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N [I(i, j) - I(i, j-1)]^2} \quad (4a)$$

$$\text{CF} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^M [I(i, j) - I(i-1, j)]^2} \quad (4b)$$

$$\text{MDF} = \sqrt{w_d \cdot \frac{1}{MN} \sum_{i=2}^M \sum_{j=2}^N [I(i, j) - I(i-1, j-1)]^2} \quad (4c)$$

$$\text{SDF} = \sqrt{w_d \cdot \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{i=2}^M [I(i, j) - I(i-1, j+1)]^2} \quad (4d)$$

这里图像大小为 $M \times N$, $w_d = 1/2^{1/2}$ 为距离的权重,可以认为(4a)和(4b)中的 $w_d = 1$ 。空间频率反映了图像空间域的总体活跃度,其值越大,说明图像所包含的边缘变化越多,图像对细节的保持越好。

图像熵用来衡量图像所包含的平均信息量的多少,表达式为:

$$H = - \sum_{i=0}^L P(i) \log_2 P(i) \quad (5)$$

式中: $P(i)$ 为某灰度值 i 在图像中出现的概率; L 为图像的灰度等级,对于 8 bit 图像, $L = 255$ 。融合图像中的信息熵越大,说明图像中包含的信息越多,融合效果越好。

平整度表征图像灰度变化的剧烈程度,表达式为:

$$R = 1 - \frac{1}{1 + \sigma^2} \quad (6)$$

式中: σ^2 为归一化的图像方差, $\sigma^2 = \frac{1}{L^2} \sum_{i=0}^L (i - m)^2 p(i)$,

$m = \sum_{i=0}^L i \cdot p(i)$ 为图像的期望。图像方差越大,其平整度的值越大,说明灰度级变化越明显,纹理信息越清晰。

基于 HVS 的峰值信噪比 (HPSNR)^[15]不需要参考图像,其引入人类视觉系统 (HVS) 特性,结合空间频率和对比度敏感度权值矩阵,建立了一种符合主观评判结果图像信噪比客观评价模型。首先利用模板遍历图像,通过式(4)得到图像的空间频率矩阵,并按下式进行归一化处理

$$\text{SF}_{\text{mod}} = (\text{SF} - \text{SF}_{\text{min}}) / (\text{SF}_{\text{max}} - \text{SF}_{\text{min}}) \quad (7)$$

结合对比度敏感度公式:

$$\text{CSF}(f) = 2.6(0.0192 + 0.114f) \times \exp(-(0.114f)^{1.1}) \quad (8)$$

将上式中的自变量 f 定义为归一化空间频率 SF_{mod} 。再定义图像的噪声矩阵为:

$$I_n(x, y) = \text{abs}(\bar{I}(x, y) - \bar{I}_0(x, y)) \quad (9)$$

式中: $\bar{I}(x, y)$ 为模板内的像素灰度均值, $\bar{I}_0(x, y)$ 为去除模板中心点像素后的像素灰度均值。这样,基于 HVS 的图像峰值信噪比表达式为:

$$\text{HPSNR} = 10 \times \lg(255^2 / \text{mean}(\text{CSF}(\text{SF}_{\text{mod}}) \times I_n)) \quad (10)$$

对比实验中,基层和细节层 gamma 映射的系数

分别为 0.75 和 1.25，饱和比例为 0.01。

本文方法中拉格朗日乘子 $\lambda=1/40$ ，文献[7]基于 BF&DRP 的融合方法，双边滤波的空间域方差为 $\sigma_g = \sqrt{M^2 + N^2} \times 2\%$ ，灰度域方差 $\sigma_r=0.01$ ，细节层合成比例 $p_d=0.4$ 。对于动态范围压缩后的图像，均采用离散小波变换（DWT）进行图像融合，小波变换的层数为 4。实验结果如图 4~图 7 所示。

场景 1 为刚熄火的汽车尾部，排气口为高温区域，车牌为低温区域，原始图像两个波段的低端灰度对比度都太低，导致车牌完全不可见，高温的排气管也基本没有灰度级变化。波段 1 地面有一条斜着的黑线，波段 2 没有。而波段 2 地面有更多灰度变化明显的斑点，波段 1 则比较平坦。场景 2 为东方明珠，波段 1 有明显的云，波段 2 没有，而波段 2 中可以看见楼房外表面每一层的分界线，波段 1 则基本看不见。通过两种框架融合后，原始图像中双波段信息得到互补，细节也能明显增强，比如场景 1 中的车牌清晰可见，排气管也能看到更多的细节信息；场景 2 楼房侧面的

字更加清晰，东方明珠上的玻璃纹理信息也更丰富。不同的是，文献[7]基于 BF&DRP 的融合框架在对比度拉伸和细节增强的同时，探测器的固定图案噪声也被放大，融合图像有明显的竖条纹，而本文提出的基于 TV&DRP 的融合框架较好的抑制了噪声的放大。比较直方图信息可以看出，本文方法融合后的图像灰度级基本覆盖了 0~255 整个动态范围，说明该方法比文献[7]方法具有更多样性的灰度值，能够显示出更细腻的细节信息。

以上是主观的视觉评价，下面通过客观的评价指标来比较两种框架的优劣，如表 1 所示。

从表 1 中可以看出，本文基于 TV&DRP 的融合框架在空间频率、熵、平整度以及峰值信噪比四个指标上都要优于文献[7]基于 BF&DRP 的融合框架。空间频率和平整度大，说明图像含有的边缘信息多，对细节的表达能力要更好，而图像熵大说明能从原始图像中融合得到更多的信息量，基于 HVS 的峰值信噪比则表征图像的噪声水平，值越大说明图像的噪声越低，视觉效果越好，这也与主观评价结果一致。

| 表 1 客观指标评价 | | | Table 1 Objective evaluation | | |
|-------------|---------|--------|-------------------------------|-------|---------------|
| 场景 | 框架 | 空间频率 | 信息熵 | 平整度 | 基于 HVS 的峰值信噪比 |
| 1.汽车尾部 | 文献[7]方法 | 13.119 | 5.162 | 0.034 | 62.457 |
| | 本文方法 | 15.301 | 5.332 | 0.054 | 63.278 |
| 2.东方明珠 | 文献[7]方法 | 13.110 | 5.032 | 0.044 | 64.324 |
| | 本文方法 | 13.474 | 5.186 | 0.065 | 63.167 |

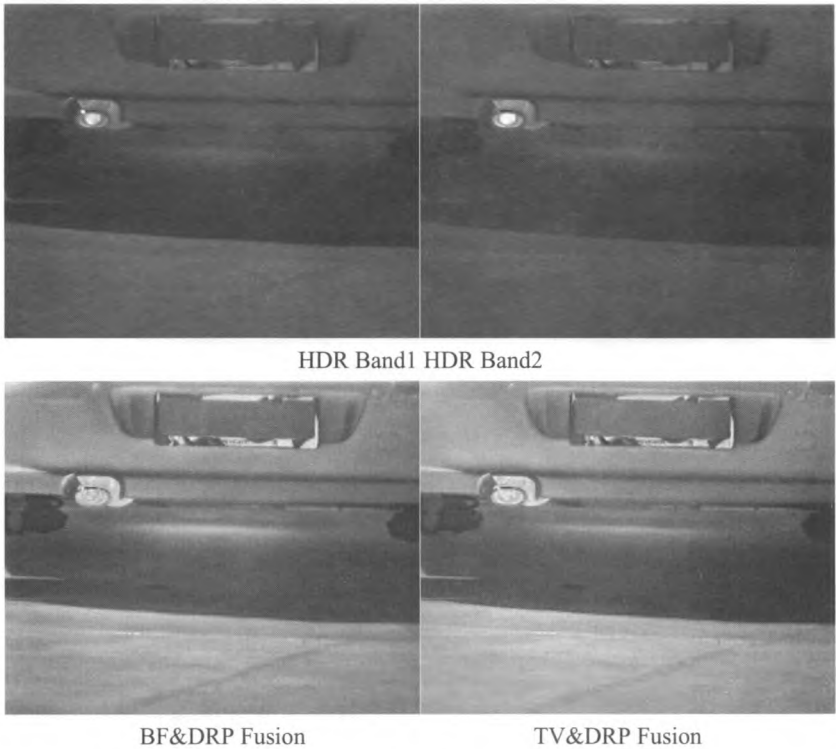


图 4 场景 1 融合结果图 Fig.4 Fusion results of scene1

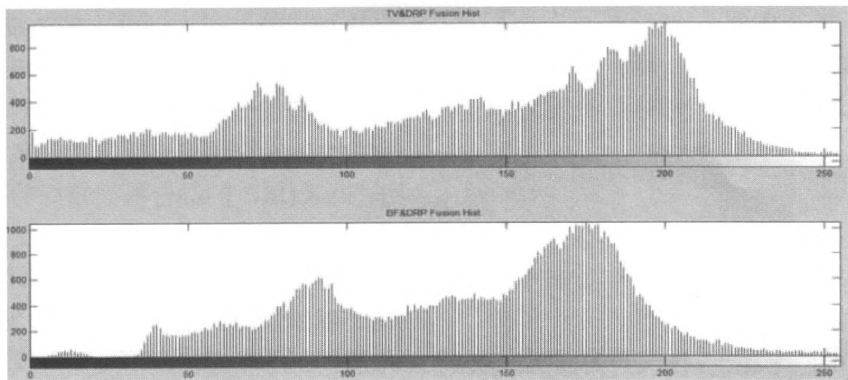


图 5 场景 1 融合图像直方图

Fig.5 Histogram of scenel fusion image

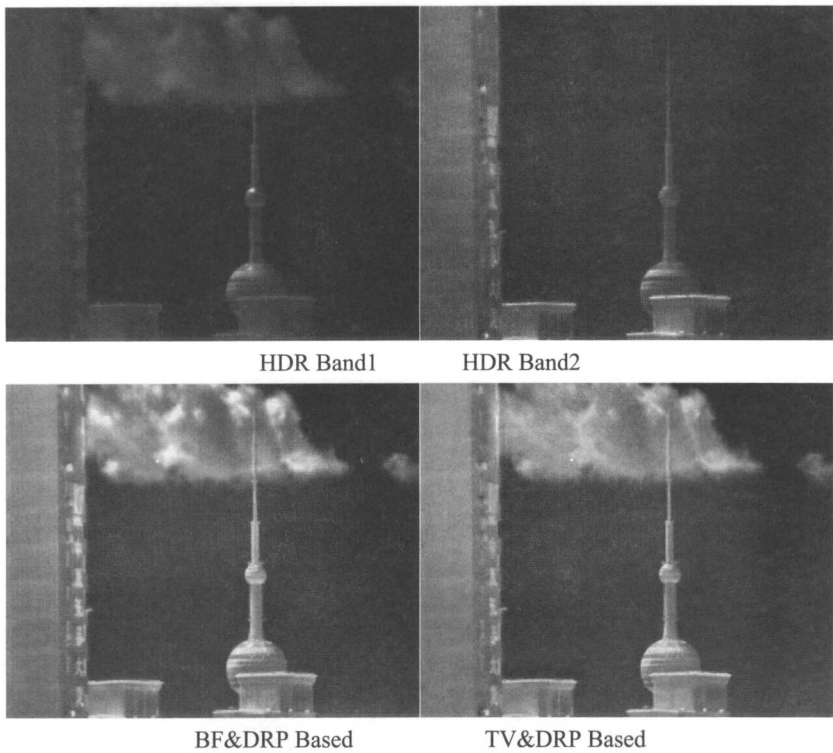


图 6 场景 2 融合结果图

Fig.6 Fusion results of scene2

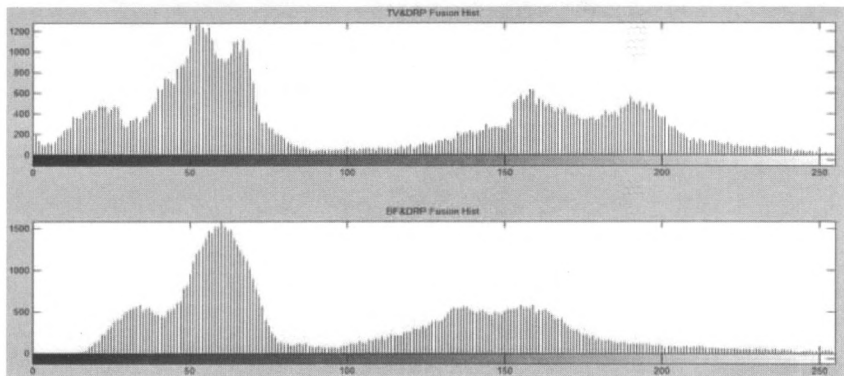


图 7 场景 2 融合图像直方图

Fig.7 Histogram of scene2 fusion image

4 结论

本文针对高动态范围的红外图像，提出了一种基

370

万方数据

于数字全变分滤波器的融合框架，该方法将图像分为一个基层和多个细节层，再对每一层分别进行动态范围压缩，以便能够更细致的处理细节信息。该框架需

要设置的参数较少，相比于文献[7]中的框架，更加灵活方便，能够融合得到更多的信息量。在图像合成阶段，能够自适应的生成权重系数，在突出细节的同时抑制噪声的放大，显著提高融合图像的可视性。

参考文献：

- [1] C.A. Glasbey. An Analysis of Histogram-Based Thresholding Algorithms[J]. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 1993: 532-537.
- [2] J. Yinpeng, L. Fayad, A. Laine. Contrast Enhancement by Multi-Scale Adaptive Histogram Equalization[J]. *SPIE Proceedings series on International Society for Optical Engineering*, 2001, **4478**: 206-213.
- [3] Virgil E. Vickers. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery[J]. *Opt. Eng.* 1996, **35**(7): 1921-1926.
- [4] A. M. Reza. Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement[J]. *Journal of Signal Processing*, 2003, **38**: 35-44.
- [5] Francesco Branchitta, Marco Diani, Giovanni Corsini. Dynamic range compression and contrast enhancement in IR imaging systems[C]//*Proc. SPIE, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications IV*, 2007: 6737.
- [6] Francesco Branchitta, Marco Romagnoli, Marco Diani and Giovanni Corsini. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. *Opt. Eng.* 2009, **48**(9): 096401-096401-9.
- [7] Yuchi Liu, Yipeng Li, Qionghai Dai. High dynamic range fusion for enhanced vision[C]. *Proc. SPIE 8360, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications LX*, 83600S (May 1, 2012).
- [8] Fredo Durand, Julie Dorsey. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 2002, **21**: 257-266.
- [9] Tony F. Chan, Stanley Osher, Jianhong Shen. The Digital TV Filter and Nonlinear Denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(2): 231-241.
- [10] L. Rudin, S. Osher, E. Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Phys. D*, 1992, **60**: 259-268.
- [11] Jie Sun, Qin Zhang, Feng Wang, et al. On the Generalization of Digital Total Variation Filter[C]// *in Congress on Image and Signal Processing*, 2008: 384-388.
- [12] 刘永进, 张国华, 赵亦工. 数字全变分滤波在红外图像序列非均匀校正中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(8): 2216-2221.
- [13] Bin Liu, Xia Wang, Weiqi Jin. Infrared image detail enhancement based on local adaptive gamma correction[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, **10**: 021002.
- [14] Yufeng Zheng, Edward A. Essock, Bruce C. Hansen, et al. A new metric based on extended spatial frequency and its application to DWT based fusion algorithms[J]. *Information Fusion*, 2007, **8**: 177-192.
- [15] 田媛. 灰度图像无参考质量评价方法研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2010: 78-80.