

一种基于差异特征螺旋线映射的红外中长波图像彩色融合方法

张润琦, 赵灿兵, 洪闻青*, 苏俊波, 刘传明

昆明物理研究所夜视技术研究院, 云南 昆明 650223

摘要 当前主流的中长波彩色融合算法中,除少数色彩映射算法以源图像差异特征为切入点,其他如色彩传递等融合算法往往损失较多差异及细节特征。主流色彩映射算法还存在偏色、色域较窄和难以适应各类应用场景等问题。针对上述问题,在以色调饱和度色彩平面为基础的色空间中,建立了基于差异特征的螺旋线映射理论模型,并基于此提出融合算法。对实际采集到的中长波双波段图像进行仿真验证,结果表明该算法适用于大多数复杂场景且能充分突出红外中波图像差异成分,具有更广的色域分布、更好的视觉效果和较好的客观指标评价,且计算复杂度低、实时性好。最终在嵌入式平台上完成算法嵌入,结果表明算法已具备工程应用前提。

关键词 图像处理; 图像融合; 红外双波段; 色彩映射; 色彩空间

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0810009

Color Fusion Method of Infrared Medium and Long Wave Images Based on Helix Mapping of Differential Features

Zhang Runqi, Zhao Canbing, Hong Wenqing*, Su Junbo, Liu Chuanming

Kunming Institute of Physics, Kunming, Yunnan 650223, China

Abstract In the current mainstream medium and long wave color fusion algorithms, except a few color mapping algorithms take the difference features of the source images as the starting point, others such as color transfer algorithms often lose more difference and detail features. However, mainstream color mapping algorithms have some problems such as color bias, narrow color gamut, and difficulty in adapting to various application scenarios. In this paper, the above problems are studied. In the color space based on a hue saturation color plane, a theoretical model of helical line mapping based on difference features is established, and a fusion algorithm is proposed based on this theoretical model. The actually collected medium and long wave dual-band images are simulated and verified. The simulation results show that the proposed algorithm is suitable for most complex scenes and can fully highlight the difference components of infrared mid-wave images. The proposed algorithm has wider color gamut distribution, better visual effect, and better objective index evaluation, and has low computational complexity and high real-time performance. Finally, the embedding of the algorithm is completed on the embedded platform. The results show that the algorithm has the premise of engineering application.

Key words image processing; image fusion; infrared dual-band image; color mapping; color space

1 引言

红外成像技术是一种广泛运用于军事及民用领

域的被动式成像探测技术,具有可全天候成像、探测精度高、隐蔽性强、抗干扰能力强等优点。由于各波长红外辐射在大气中的透过率不同,将大气透过率

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-04-11; 录用日期: 2021-04-29

通信作者: hongwenqing@aliyun.com

较高(大气窗口)的红外辐射按波长划分为短波红外、中波红外和长波红外,三个波段的成像效果显著不同,且在不同场景、不同应用有着各自的优势。因此,随着远距离探测、高精度识别、全方位抗干扰和环境适应可靠性等应用对红外探测成像技术的要求不断提高,传统单波段红外成像技术越来越难以满足如上需求。以克服单一波段图像局限性为目的的双波段红外热成像技术具有更加广阔的研究前景,其能够同时获取目标在两个红外波段的辐射特性,具备较单波段红外成像更强的反隐身能力。因此多波段红外热像仪在兼顾单一波段的探测优势的条件下,能提高系统对环境和目标变化的适应性,从而有效提高系统探测识别的正确性。

中长波双波段红外图像彩色融合领域中主要的融合方法分为色彩映射、色彩传递、颜色查找表和神经网络 4 类^[1]。其中,色彩传递算法需要计算如图像均值、方差等全局信息,因此在硬件实现上往往需要额外一帧以上的延时时间,同时在算法的实际使用时,还需根据场景手动选取参考图像,才能获得适应人眼观察的色彩;而神经网络算法受限于有限的红外中长波双波段图像的训练数据和网络架构,无法实现所需的嵌入式硬件平台。因此,实际实现工程化应用的中长波双波段彩色融合算法当前仍以色彩映射和颜色查找表方法为主。颜色查找表本质是按一定规则构建一组颜色查找表,该规则可以由其他融合算法直接得出,此时研究内容的核心本质是构建查找表的算法。该规则也可以由指定策略进行查找表构建并最终将其补全,Toet 等^[2-3]对颜色查找表的补全构建和算法改进进行了大量研究,但颜色查找表融合算法仍存在视频融合颜色稳定性差的问题,随着时间推移易出现变色、识别度下降等情况。

因此,色彩映射仍是当前应用最为成熟广泛的融合算法。典型的色彩映射算法有 NRL(National Research Laboratory)算法、TNO 算法^[4]和各类衍生算法^[5]等。NRL 算法及其衍生算法的本质是利用源图像数据、依照辐射特性和人眼习惯,直接对色彩空间进行赋值。因此,该方法在不进行色彩空间转换的情况下,计算速度极快,但融合结果却难以凸显人眼对双波段图像感兴趣的部分(隐藏的细节和源图像差异信息)。且由于中波和长波图像在大部分场景下的特征较为相似,单纯地对色彩空间进行赋值,往往会造成融合图像色彩分布集中在色彩

空间某区域内,由此产生偏色问题。TNO 算法以人眼感兴趣的双波段差异特征为切入点,通过一定规则进行简单图像差异加减计算,最终达到增强源图像独有细节的目的。但在部分场景,该算法盲目放大两者差异,容易将信号幅值较小波段的有效信息覆盖,色彩鲜艳失真现象严重。虽然后续有不少学者针对该问题进行了算法改进研究,但往往也带来了一些新的问题,如图像整体色彩分布在色彩空间被压缩,较小但不同的差异特征难以用人眼可辨的色彩区分,以及计算量增大等^[6]。

针对上述问题,本文以中长波双波段源图像之间的差异特征信息为切入点,对如何将该一维差异特征映射至二维色彩平面进行了研究分析,提出了一种新的中长波双波段色彩映射类融合算法,使源图像差异特征在融合图像的色彩上表现更为显著,融合图像的色彩层次更为丰富。使用中长波双波段红外热像仪在各类复杂场景下采集了大量图像数据,对融合结果进行仿真验证和客观指标分析,并最终在基于 FPGA(Field Programmable Gate Array)的嵌入式硬件平台上完成算法嵌入、时序仿真和硬件综合工作,从而为下一步工程化应用作铺垫。

2 基本原理

2.1 螺旋线映射原理

相较于红外中短波图像或红外-可见光图像,红外中波和长波图像在大多数场景下均较为相似,在针对如反隐身等应用领域中,更需要关注的应当是中长波辐射灰度差异部分。TNO 算法是典型的以差异特征为切入点的彩色融合算法,其最早在 RGB 色彩空间上实现,核心思想为先求解两幅源图像的差异,再将每一幅源图像加上另一幅图像与该图像的差异,将其送入色彩空间中的两个通道。红外中波和长波图像差异较大时,盲目放大两幅图像差异会造成融合图像色彩过于刺激,虽然后续有学者引入局部清晰度值来改进 TNO 算法,或是在如 YCbCr 等其他色彩空间上进行研究,但其在各个色彩通道的映射始终受到源图像的影响,且难以遍历整个色彩空间的所有色调范围。

我们希望两个波段图像相同的部分在融合图像中仅呈现亮度信息而无色彩信息,而两个波段图像存在差异的部分则呈现出色彩差异。因此可以将相同部分映射到亮度通道,而将差异部分映射到色彩通道。波段差异是一个一维的变量,而色彩空

间除去亮度是一个二维的空间,因此需要找到一个合适的映射实现一维变量到二维空间的映射。

在进行映射的过程中,同样的源图像灰度差异应当能够得到同样的色彩差异,波段差异越大,色彩差异也越大,即色彩差异和源图像灰度差异成正比。设波段差异用变量 z 表示,二维色彩平面用极坐标 (r, θ) 表示,则可以得到

$$\frac{D(r, \theta)}{D(z)} = C, \quad (1)$$

式中: $D(r, \theta)$ 表示二维色彩差异; $D(z)$ 表示波段差异; C 为正实数。若采用欧几里得距离作为差异度量,则可进一步得到

$$\frac{\sqrt{r^2 \cdot \sin^2 \theta + r^2 \cdot \cos^2 \theta}}{\sqrt{z^2}} = \frac{r}{|z|} = C. \quad (2)$$

将波段差异 z 以角度 θ 表示,即由(2)式可得极径 r 为

$$r = C \cdot |\theta|. \quad (3)$$

在 (r, θ) 平面中,(3)式恰好是一条以原点为起点的螺旋线方程。当 $\theta > 0$ 时,螺旋线随着 r 的增大向逆时针方向旋转;当 $\theta < 0$ 时,螺旋线随着 r 的增大向顺时针方向旋转。

进一步地,可以将波段差异以螺旋线方程映射的色彩平面选为色调-饱和度平面,其中色调对应角度 θ ,这里将 θ 的取值范围由 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 更换至 $(0^\circ, 360^\circ)$,饱和度对应极径 r , r 的取值范围为 $(0, 1)$ 。两个波段的差异分别各占一半色调,若选取色调 0° 为初始角度,则双波段差异在色调-饱和度色彩平面的映射如图 1 所示。

如果源图像中长波灰度值高于中波灰度值,则由中长波红外辐射特性可知,差异特征将映射在色彩平面上暖色调部分,反之,则映射至冷色调部分。目标及高温物体以红色或黄色展现,天空及背景以蓝色或绿色展现,差异越大则色彩饱和度越高,图像无差异则无色彩表现,以灰度图像呈现。这样融合图像色彩有一定可解释性,同时对于大部分场而言,融合图像始终处于无偏色状态,适合人眼观测。

基于以上理论,并结合现有色调饱和度色彩平面的色彩空间,本文算法在 HSV 色彩空间中得出以下色彩映射融合算法。HSV 是应用最为广泛的色彩空间之一^[7],其中 V 通道为亮度信息, H 和 S 通道为色彩信息。将中长波双波段图像经过简单的加权平均融合后送入 V 通道,则 V 通道图像 F_V 为

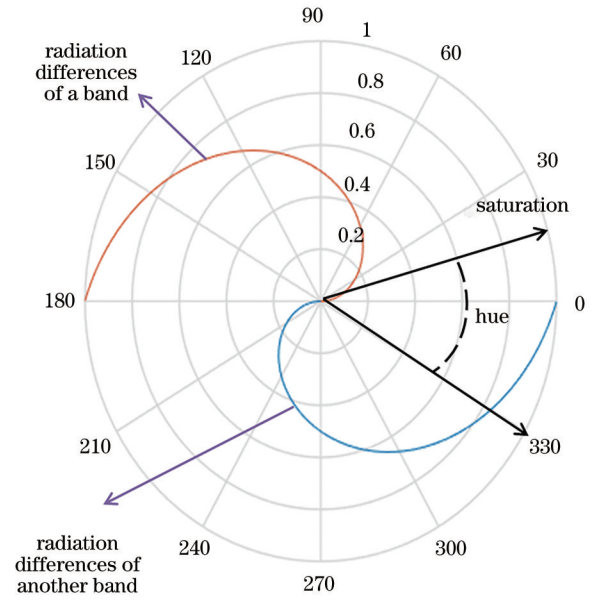


图 1 差异特征在色调-饱和度色彩平面上的螺旋线映射
Fig. 1 Helical mapping of differential features on hue-saturation color plane

$$F_V = \frac{1}{2}(F_{LW} + F_{MW}), \quad (4)$$

式中: F_{LW} 和 F_{MW} 分别为红外长波和中波图像。

采用与 TNO 算法原理一致的波段差异特征计算方法,长波图像差异成分 V_{LW} 可由 F_{LW} 除去中波和长波图像的共有成分 $F_{LW} \cap F_{MW}$ 得到,中波图像差异成分 V_{MW} 可由 F_{MW} 除去中波和长波图像的共有成分 $F_{LW} \cap F_{MW}$ 得到。

$F_{LW} \cap F_{MW}$ 为中波和长波图像的共有成分,通过比较两者的局部并取最小值实现:

$$F_{LW}(i, j) \cap F_{MW}(i, j) = \text{Min}\{F_{LW}(i, j), F_{MW}(i, j)\}, \quad (5)$$

式中: (i, j) 为图像中某一点的坐标。

差异成分在 HSV 色彩空间中 HS 平面螺旋线映射为

$$\begin{cases} F_H = 0.5 + 0.5 \times V_{LW}, & V_{LW} > 0 \\ F_H = 0.5 \times V_{MW}, & V_{MW} > 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$F_S = V_{LW} + V_{MW}, \quad (7)$$

式中: F_H 和 F_S 分别为 HSV 色彩空间的 H 通道图像和 S 通道图像,其中 H 通道图像的取值范围为 $(0, 1)$,对应色调-饱和度色彩平面的取值范围为 $(0^\circ, 360^\circ)$ 的角度 θ , S 通道图像的取值范围为 $(0, 1)$,对应色调-饱和度色彩平面的取值范围为 $(0, 1)$ 的极径 r 。在实际使用中,可以对螺旋线映射的初始角度进行调整,或者对波段差异映射半轴进

行调整,即只需对公式进行调整,最后将融合图像由 HSV 色彩空间转化至 RGB 色彩空间用于输出即可。

综上所述,本文提出算法的总体流程如图 2 所示。

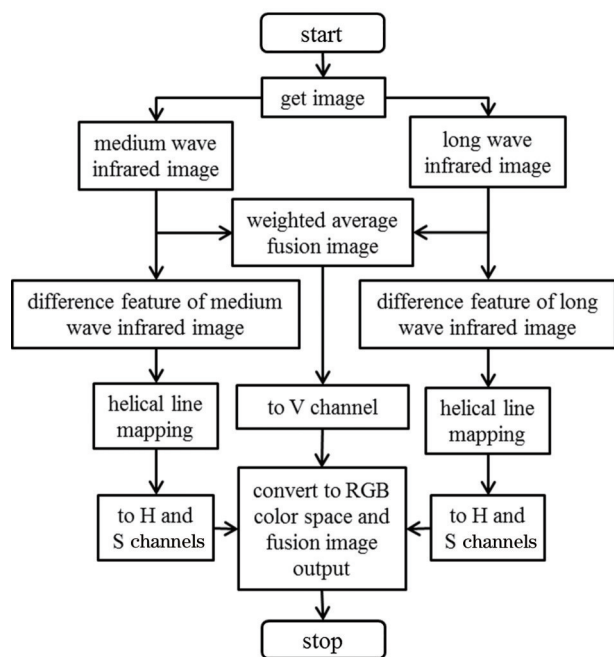


图 2 本文算法的总体框架

Fig. 2 Overall framework of algorithm in this paper

2.2 仿真

使用本文算法对使用中长波双波段红外热像仪采集的大量不同场景下的中长波红外图像或文献中的典型中长波红外图像进行仿真,并将其与其

他应用最为广泛的中长波彩色融合算法进行对比。用于对比的算法包括 NRL 算法、TNO 算法和色彩传递算法,其中色彩传递算法所使用的参考图像如图 3 所示,该参考图像在多数应用场景中的参考均值和方差均适宜。这里选取了三组较为典型的仿真场景进行展示,分别记为场景 1、场景 2 和场景 3,各场景中长波源图像及各算法仿真效果如图 4、图 5 和图 6 所示。



图 3 本文色彩传递图像融合所使用的参考图像

Fig. 3 Reference image used for color transfer image fusion in this paper

对场景 1 中水面舰艇左侧黑框内的英文字母在各图右下角进行放大展示,由图 4(a)和图 4(b)可以看出,无论是中波还是长波,该字母的辨识度均不高,而图 4(c)、图 4(d)和图 4(e)等主流算法在字母辨识度上同样不高,图 4(e)所示为本文算法结果,可以看出该字母辨识度有较大提升。这表明本文

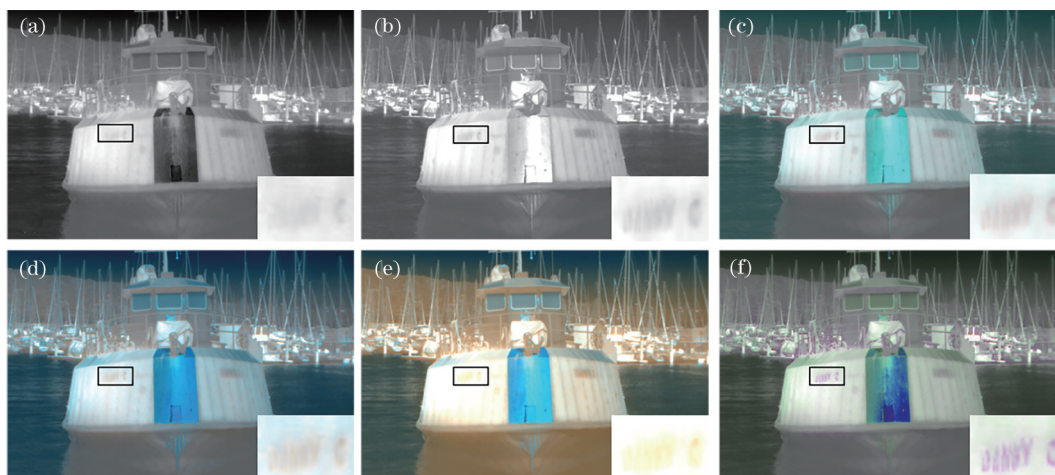


图 4 各算法对场景 1 的融合结果。(a)红外长波图像;(b)红外中波图像;(c)NRL 融合结果;(d)TNO 融合结果;(e)色彩传递融合结果;(f)本文所提算法的融合结果

Fig. 4 Fusion results of all algorithms for scene 1. (a) Infrared long wave image; (b) infrared medium wave image; (c) NRL fusion result; (d) TNO fusion result; (e) color transfer fusion result; (f) fusion result of proposed algorithm

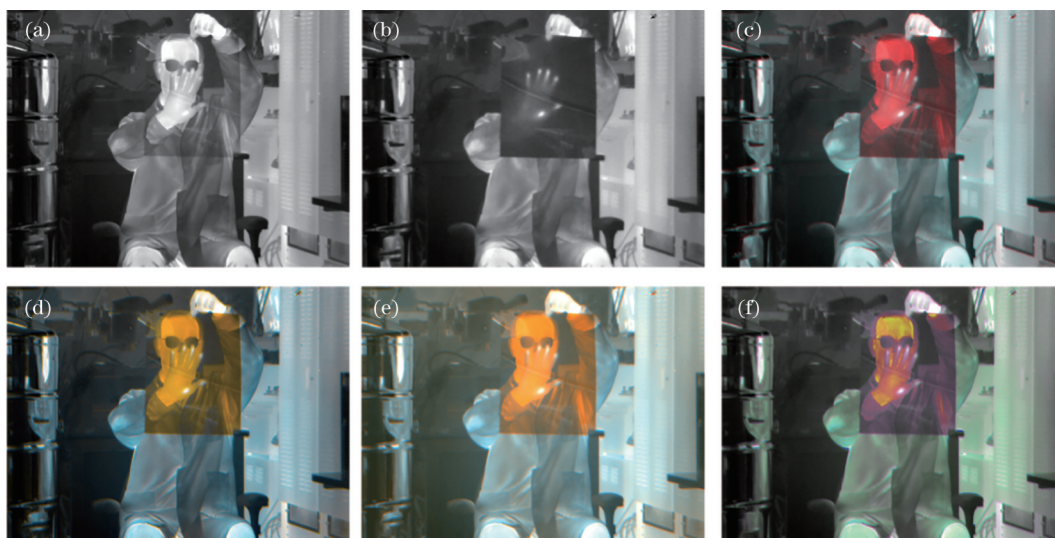


图 5 各融合算法针对场景 2 的仿真结果。(a)红外中波图像;(b)红外长波图像;(c)NRL 融合结果;(d)TNO 融合结果;(e)色彩传递融合结果;(f)本文提出算法的融合结果

Fig. 5 Fusion results of all algorithms for scene 2. (a) Infrared medium wave image; (b) infrared long wave image; (c) NRL fusion result; (d) TNO fusion result; (e) color transfer fusion result; (f) fusion result of proposed algorithm

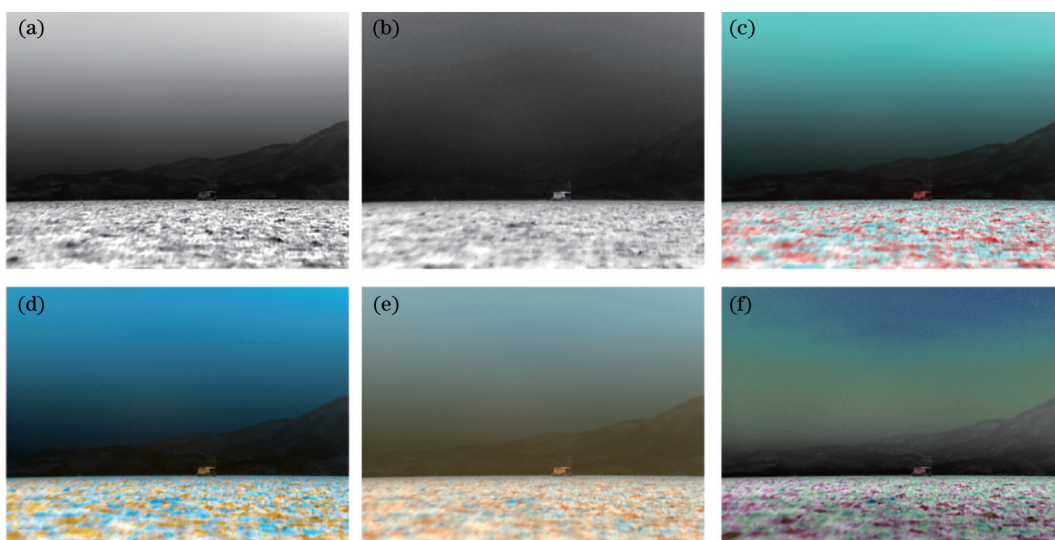


图 6 各融合算法针对场景 3 的仿真结果。(a)红外中波图像;(b)红外长波图像;(c)NRL 融合结果;(d)TNO 融合结果;(e)色彩传递融合结果;(f)本文提出算法的融合结果

Fig. 6 Simulation results of all algorithms for scene 3. (a) Infrared medium wave image; (b) infrared long wave image; (c) NRL fusion result; (d) TNO fusion result; (e) color transfer fusion result; (f) fusion result of proposed algorithm

算法较其他算法更能凸显人眼感兴趣部分(差异及细节特征),同时在色彩分布上,本文算法遍历从绿、青、蓝三种色调和不同饱和度,较其他算法的色彩丰富。

由图 5(a)和图 5(b)可以看出,图中人物手持材料的红外长波辐射透过率远大于中波材料,在材料后的区域中长波图像差异信息是关注重点,对比图 5(c)、图 5(d)、图 5(e)和图 5(f),可以明显看到本

文算法得到的人体色调遍历红、橙、紫,在局部细节及色彩表现较其他算法更为丰富。

由图 6(a)和图 6(b)可以看出,场景 3 较好地展示了中波和长波图像的波段特征,长波图像天空和目标辐射差异较大,较中波图像具有更好的目标凸显能力,但长波辐射在高湿度环境下损耗较大,更远处的山几乎难以观测;中波图像包含了大量环境辐射反射信息,天空和水面均有更多的环境辐射和

反射能量。对比图 5(c)、图 5(d)、图 5(e)和图 5(f)可知,本文算法较其他算法在直观上具有更丰富的色彩和更多的层次感,且远处的山较中长波源图像和其他融合算法所得结果具有更佳的通透性。

3 分析与讨论

当前对彩色图像融合暂时没有一套成熟的客观评价体系^[8]。但一般来说,图像所含信息越丰富,质量越好,因此目前公开的文献多使用总信息熵来评价彩色融合图像^[9]。总信息熵 H_{RGB} 的计算式为

$$H_{RGB} = \frac{\sqrt{3}}{3} \times \sqrt{H_R^2 + H_G^2 + H_B^2}, \quad (8)$$

式中: H_R 、 H_G 和 H_B 分别表示 RGB 色彩空间中红色通道、绿色通道和蓝色通道的信息熵。各通道信息熵 H 的计算式为

$$H = - \sum_{i=0}^{255} p(i) \cdot \log_2 p(i), \quad (9)$$

式中: $p(i)$ 表示第 i 灰度级上的像素分布概率。

表 1 展示了上述对比算法在上述三个场景下的总信息熵以及在各场景下使用中长双波段红外热像仪实际采集到的 40 组图像的总信息熵均值,囊括了海天、天空、车辆、道路、城市建筑和山林等多种场景。可以看到,本文算法在多数情况下的总信息熵均优于其他算法。

本文算法具有极低的计算复杂度和极高的运算速度。在 Xilinx XC7K480T FPGA 上的硬件实现情况如图 7 所示。可以看到本文算法占用的硬件资源小于 0.1% 的总资源,且算法耗时在 19 个时钟以内,即在 10 MHz 像素时钟频率下,从输入图像开始仅需经过 2 μ s 计算耗时即可开始输出图像。

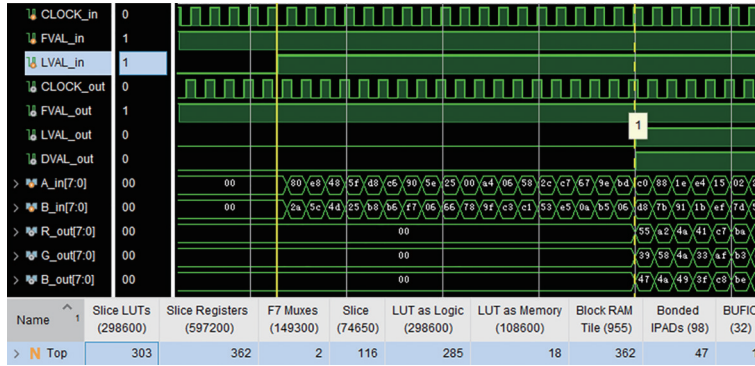


图 7 本文算法在 Xilinx XC7K480T FPGA 上的硬件实现情况

Fig. 7 Hardware implementation of proposed algorithm on Xilinx XC7K480T FPGA

表 1 各个算法针对各个场景的总信息熵

Table 1 Total information entropy of each fusion algorithm in each scene

Scenario	Fusion method			
	NRL	TNO	Color transfer	Proposed algorithm
Scenario1	7. 2782	7. 2789	7. 1658	7. 4161
Scenario2	7. 7681	7. 6938	7. 6035	7. 6373
Scenario3	6. 5852	6. 8582	7. 0798	7. 4949
Average	6. 3867	6. 3733	6. 6226	6. 9414

4 结 论

着眼红外中长波图像的差异特征,对该信息在色彩空间中更加合理的映射展开了研究,首次提出在色调饱和度色彩平面的螺旋线映射模型,所提方法属于色彩映射类图像融合,较 NRL 和 TNO 等主流色彩映射方法对中长波辐射差异特征的色彩映

射更为合理,实际融合结果在主观视觉效果和客观评价指标上均有明显优势,且能更鲜明地突出视觉关注点的信息,在各类复杂场景下均能保持稳定的融合效果。同时,本文算法依然具备色彩映射类融合算法极易实现工程应用的优势,由于色彩传递等算法需要利用一整幅图像的数据才能计算均值或方差等必要的全局参数,因此在嵌入式硬件实现中此类算法至少有一帧的输出延时,本文算法对硬件水平要求极低,能充分保证实时性,在未来具备广阔的工程应用前景。

参 考 文 献

[1] Han Z. A study of multiband image adaptive fusion based on deep learning[D]. Taiyuan: North University of China, 2018.
韩泽. 基于深度学习的多波段图像自适应融合方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.

- [2] Toet A, Hogervorst M A, van Son R, et al. Augmenting full colour-fused multi-band night vision imagery with synthetic imagery in real-time[J]. International Journal of Image and Data Fusion, 2011, 2(4): 287-308.
- [3] Wang L X, Jin W Q, Zhao Y M, et al. Fast natural color fusion method for dual band video based on color look-up table: CN101867685A[P]. 2012-03-14. 王岭雪, 金伟其, 赵源萌, 等. 基于颜色查找表的双波段视频快速自然感彩色融合方法: CN101867685A[P]. 2012-03-14.
- [4] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion[J]. Optical Engineering, 1996, 35(3): 650-658.
- [5] Su Y L, Su J B, Fan Y H, et al. Study on color mapping for MWIR and LWIR image fusion[J]. Infrared Technology, 2019, 41(4): 335-340. 粟宇路, 苏俊波, 范益红, 等. 红外中长波图像彩色融合方法研究[J]. 红外技术, 2019, 41(4): 335-340.
- [6] Ansorge U, Horstmann G, Carbone E. Top-down contingent capture by color: evidence from RT distribution analyses in a manual choice reaction task [J]. Acta Psychologica, 2005, 120(3): 243-266.
- [7] Liu S H, Wu W B, Bu L J. SAR image pseudo color encoding based on optimum index and HSV color space[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(10): 166-169. 刘树辉, 武文波, 卜丽静. 基于最佳指数与 HSV 彩色空间的 SAR 图像伪彩色融合[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(10): 166-169.
- [8] Lou S L, Yu Z J. The study of colored image quality assessment based on FSIM & diverse color models [J]. Computer Knowledge and Technology, 2017, 13(7): 226-228. 娄申龙, 虞中捷. 基于 FSIM 和不同颜色模型的彩色图像评价方法研究[J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(7): 226-228.
- [9] Xie Z X, Wang Z F, Xiong X L, et al. Color image quality assessment based on noise model of human vision perception and color image quality optimization[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(10): 1454-1464. 谢正祥, 王志芳, 熊兴良, 等. 基于视觉感知噪声模型的彩色图像质量评价和彩色图像质量最佳化[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(10): 1454-1464.