

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2012 **10**
Vol.17 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2012年10月 第17卷 第10期(总第198期)

目次

综述

张量值图像插值方法综述 邵宇, 刘莹, 孙富春(1197)

图像处理和编码

利用模运算及其周期性特点的安全隐写算法 廖琪男(1206)

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽(1213)

Weber 定律下尺度空间的自适应构建 刘立, 张瑞军, 万亚平, 黄欣阳, 彭复员(1222)

改进权值函数的非局部均值去噪算法 单建华(1227)

图像分析和识别

非相似度保持投影 陈才扣, 侯钰(1232)

非正交二值子空间模板表示的并行生成 杨培, 武港山, 杨扬, 任桐炜(1237)

Adaboost 和随机图划分的无监督图像分类 李巍, 杨素锦, 段晓华(1245)

aiNet 背景抑制的单帧红外弱小目标检测 陈炳文, 王文伟, 秦前清(1252)

韦伯-中心环绕结构的图像显著性检测模型 林丽莉, 周文晖(1261)

气象传真图信息提取 李存东, 肖传毅, 潘海朗, 陈日清, 杨劲松(1268)

图像理解和计算机视觉

多要素空间场景相似性匹配模型及应用 宋腾义, 汪闽(1274)

计算机图形学

Delaunay 三角网通用合并算子及分治算法的简化 刘永和, 冯锦明, 郭维栋, 田根, 金毅(1283)

基于 Laplace 谱嵌入和 Mean Shift 的三角网格一致性分割 马亚奇, 李忠科, 赵静(1292)
断裂面匹配的破碎刚体复原 李群辉, 周明全, 耿国华(1298)

虚拟现实与增强现实

核爆炸外观景象实时模拟 郑涛, 徐晓刚, 邵承永(1305)

医学图像处理

全局脑白质纤维群智能跟踪算法 冯远静, 王哲进, 张贵军, 俞立(1312)

遥感图像处理

对偶四元数线阵遥感影像几何定位 盛庆红, 姬亭, 刘微微, 王惠南(1319)

修正安装矩阵提高 FY-3B/MERSI 的地理定位精度 吴荣华, 杨忠东, 关敏, 李翔翔(1327)

中国图象图形学报

刊名题字: 宋 健

月刊(1996 年创刊)

第 17 卷 第 10 期

2012 年 10 月 16 日出版

主管单位 中国科学院

主 办 中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会

北京 9718 信箱 邮编 100101
电子信箱:jig@irsa.ac.cn
电话:010-64807995 010-82614429
网 址:www.cjig.cn

印刷装订 北京北林印刷厂

广告经营许可证 京朝工商广字第 0346 号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
(中国国际书店)
(北京 399 信箱 邮编 100044)

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing Application,
CAS China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational
Mathematics

Chief editor LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board
of Journal of Image and Graphics
(P. O. Box 9718, Beijing 100101, China)
E-mail:jig@irsa.ac.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers
and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation
(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Printed by Beijing Beilin Printing House

ISSN 1006-8961 CN11-3758/TB CODE ZTTFXZ 国内邮发代号: 82-831 国外发行代号: M1406 国内定价: 45.00 元

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 17 No. 10 October 2012

Contents

Review

Overview of tensor valued images interpolation technology Shao Yu, Liu Ying, Sun Fuchun (1197)

Image Processing and Coding

Secure steganography based on modulo and its cyclical characteristic Liao Qinan (1206)

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer
..... Li Yufeng, Feng Xiaoyun, Xu Mingwei, Huang Wenli (1213)

Adaptive algorithm of scale-space construction method based on Weber's law
..... Liu Li, Zhang Ruijun, Wan Yaping, Huang Xinyang, Peng Fuyuan (1222)

Non-local means denoising algorithm with enhanced weight function Shan Jianhua (1227)

Image Analysis and Recognition

Dissimilarity preserving projection Chen Caikou, Hou Yu (1232)

Parallel algorithm for generating template representation based on non-orthogonal binary subspace
..... Yang Pei, Wu Gangshan, Yang Yang, Ren Tongwei (1237)

Unsupervised image categorization based on Adaboost and stochastic graph partition Li Wei, Yang Sujin, Duan Xiaohua (1245)

Infrared dim target detection in single image based on background suppression by aiNet
..... Chen Bingwen, Wang Wenwei, Qin Qianqing (1252)

Image saliency detection model with Weber's law based on center-surround structure Lin Lili, Zhou Wenhui (1261)

Information extraction from meteorological facsimile maps
..... Li Cundong, Xiao Chuanyi, Pan Hailang, Chen Riqing, Yang Jinsong (1268)

Image Understanding and Computer Vision

Multi-feature based spatial scene matching model and its application Song Tengyi, Wang Min (1274)

Computer Graphics

Merging planar Delaunay triangulations based on universal operators and the implementation of a divide-conquer algorithm
..... Liu Yonghe, Feng Jinming, Guo Weidong, Tian Gen, Jin Yi (1283)

Consistence segmentation of triangle mesh using Laplace spectral embedding and Mean Shift
..... Ma Yaqi, Li Zhongke, Zhao Jing (1292)

Reassembly of broken 3D solids based on fractured surfaces matching Li Qunhui, Zhou Mingquan, Geng Guohua (1298)

Virtual Reality and Augmented Reality

Real-time simulation of nuclear explosion scene Zheng Tao, Xu Xiaogang, Shao Chengyong (1305)

Medical Image Processing

Global white matter tractography using swarm optimization Feng Yuanjing, Wang Zhejin, Zhang Guijun, Yu Li (1312)

Remote Sensing Image Processing

Geo-positioning line-array CCD images with dual quaternion Sheng Qinghong, Ji Ting, Liu Weiwei, Wang Huinan (1319)

Improved FY-3B/MERSI geolocation accuracy using installation matrix
..... Wu Ronghua, Yang Zhongdong, Guan Min, Li Xiangxiang (1327)

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2012)10-1213-09

论文引用格式: 李郁峰, 冯晓云, 徐铭蔚, 黄文丽. 结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(10): 1213-1221.

结合快速融合与颜色传递的双波段夜视图像染色

李郁峰^{1,2}, 冯晓云¹, 徐铭蔚², 黄文丽²

1. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031; 2. 西南科技大学计算机科学与技术学院, 绵阳 621010

摘要: 总结了近 15 年来的多传感器图像染色技术研究成果, 给出了染色算法的一般模型。在此基础上, 将图像融合技术与颜色传递技术结合, 设计了基于 YCbCr 颜色空间的夜视微光与红外图像染色算法。使用互调制快速融合充分提取源图像的空间信息, 将得到的融合图像指派给 Y 分量; 借鉴 Toet 提取图像共同分量的思路, 构造 Cb、Cr 分量; 最后应用颜色传递技术, 获得了细节丰富、目标背景对比度高, 符合场景自然颜色分布的彩色图像。因使用了互调制快速融合方法并直接构造颜色分量, 染色过程效率高且参数自适应, 可满足实时系统应用需求。

关键词: 图像融合; 夜视; 染色; 颜色传递

Night vision dual-band images coloration using fast fusion and color transfer

Li Yufeng^{1,2}, Feng Xiaoyun¹, Xu Mingwei², Huang Wenli²

1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Computer Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

Abstract: In this paper, we review the past 15 years of research in the field of night vision multi-sensor image coloration (render night vision image in color) and reveal the general coloration model. On this basis, a new coloration method using fast multi-modulation fusion (FMMF) and color transfer is designed for low-light and infrared image pairs. The coloration process is based on YCbCr color space. First, the fused image uses a fast multi-modulation fusion to merge the source images information to be assigned to the Y channel; then, the Cb and Cr channel is combined using Toet's method, which extracts the common component from the source images. Finally, the false-color image is obtained by using color transfer technology to the prior pseudo-color YCbCr image. Experiments show that the result of our method is information that is more salient, has a higher color contrast, and a more natural color appearance than others. Due to the use of fast multi-modulation fusion, the coloration process is efficient and the parameters are adaptive, and our method meets the real-time applications.

Key words: image fusion; night vision; coloration; color transfer

0 引言

在微光或夜视环境下, 低照度相机(像增强器)、近红外相机、热红外相机、SAR 等已经广泛应用于侦查、观瞄、可视图像制导等军事领域和智能监

控、模式识别、遥感、医学等众多民用领域。单个成像传感器由于波段限制通常只能获取场景某一方面的信息, 因此常用多个传感器扩大信息获取的范围和信息总量, 提高目标探测的准确性, 扩展传统探测技术的功能^[1]。然而在微光或夜视条件下获得的是表征场景空间信息的灰度图像, 缺少场景的颜色

收稿日期: 2011-11-11; 修回日期: 2012-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(10676029); 中国电子科技集团预研基金资助项目

第一作者简介: 李郁峰(1972—), 男, 副教授, 西南交通大学获电气系统控制与信息技术专业博士学位, 主要研究方向为图像处理、图像融合。E-mail: liyufeng@swust.edu.cn

信息;受成像设备物理特性和场景自然条件限制,还存在诸如对比度低、纹理细节少的缺点,增加了对图像特征和场景状态检视、理解的难度和工作强度,容易出现对目标的漏检、误判等情况。

对人的视觉系统(HVS)研究表明,人眼分辨彩色图像的能力远远强于分辨灰度图像的能力。彩色图像与灰度图像相比,增加了信息传递的维数,符合人眼的视觉特性,能更有效地表达场景特征和丰富的细节。基于这一认识,近些年来研究者提出了夜视图像染色技术,其基本意图是将夜视多波段灰度图像进行组合、变换,并最终映射到 RGB 空间,形成假彩色或伪彩色图像,达到增强图像的可视性,突出特征,充分展现图像固有的丰富信息,从而更有利于观察者对图像的目标检视、识别和理解。

从目前公开的文献报道来看,多传感器图像染色技术的研究尚处于起步阶段,其难点在于获得既能保留源图像的丰富细节特征,并具有视觉友好、接近自然色彩特征的伪彩色或假彩色图像。在全面分析总结现有图像染色算法的基础上,针对夜视双波段多传感器(热红外与可见光或近红外)夜视图像,给出了染色算法的一般模型,提出了一种能有效融合空间信息特征并达到近自然色彩效果的快速染色算法。

1 染色模型

1.1 染色算法分类

Waxman^[2]、Teot^[3]等人于 1995 年、1996 年相继提出了各自的假彩色映射染色算法,也是公开文献中多传感器染色技术较早期的研究成果。近些年来国内外更多学者开始重视并研究图像染色技术,陆续提出了多种染色算法。按照染色机理可将染色算法分为 3 类。

1) 基于 RGB 颜色空间的染色算法^[2-7]。以 Waxman^[2]、Teot^[3]等人为代表的基于 RGB 颜色空间染色算法,其基本思路是根据应用目标、夜视图像特点及人的视觉原理,将 2~3 幅夜视多波段源图像予以线性或非线性地组合或变换处理后指派给 RGB 各分量,从而得到视觉增强的彩色图像。这类算法的实质是基于实验研究的方式构造多传感器灰度图像与 RGB 各颜色分量的映射关系,首先是具有很强的主观性,只能尽量获得对人友好的颜色,很难获得比较自然的色彩效果;其次,由于 RGB 颜色空

间是一种加色模型,每一种颜色都需要 RGB 各分量按照不同比例混合形成,主观地指派 RGB 分量值容易造成图像色彩的严重混淆或者与人的视觉习惯相悖,染色效果可能达不到增强效果甚至起到负面作用。再次,加色模型也意味着 RGB 各分量高度相关,因此在染色算法中很难根据传感器成像模式和图像特征单独处理某一个颜色分量,给算法设计带来很大困难,染色效果也难以调控。

2) 基于亮度(明度)与彩色分离颜色空间的染色算法^[8-9]。亮度(明度)与彩色分离的颜色空间如 IHS 与高度相关的加色模型 RGB 相比,更符合人的视觉系统,它以人类更熟悉的方式封装了关于颜色的信息,其中亮度分量 I 表征图像能量分布即空间信息,H、S 代表了图像的颜色属性。由于 I、H、S 3 个分量相互独立,在染色过程中容易预测和控制。Jang^[8]利用了这一特性,直接在 IHS 颜色空间构造伪彩色图像,将包含丰富空间信息的可见光图像作为 I 分量,然后根据传感器物理特性和人对色彩的感知原理构造 H、S 分量,从而使染色图像既有较好的细节特征,同时又有较强的色彩对比度。而陈玉春^[9]将可见光与红外图像融合后作为 I 分量以保证染色图像的空间信息,然后根据应用目标和图像特征构造 H、S 分量。然而,基于 IHS 颜色空间的染色技术获得的仍然是伪彩色图像,如果 H、S 构造不当,图像色彩不自然,还可能出现与人视觉习惯相背离的色彩表达效果。其他颜色空间是否适用染色算法,需要根据具体应用目标,在充分研究颜色空间和染色图像属性的基础上分析选用。

3) 基于颜色传递的染色算法^[10-18]。Reinhard 等人^[19]研究表明,彩色图像各颜色分量的一阶和二阶统计值(color statistics)表达了图像的颜色特征,应用简单的线性运算,能将一幅图像(参考图像)的颜色特征传递给另一幅图像(目标图像),称之为颜色传递技术。基于这一认识,Teot^[10-11]将多传感器灰度图像作为 RGB 各分量,再将其变换到 Lab 颜色空间使用颜色传递技术,获得了与自然日光颜色接近的染色效果。由于参考图像各颜色分量的全局统计参数很难保证其颜色分布与夜视场景高度一致,这将导致染色效果的不自然。Zheng 等人^[12]应用图像分割技术将夜视图像分割成不同区域,再根据区域特征选用合适的参考图像分别进行颜色传递,力求达到视觉效果更好、更自然的染色图像。Yin^[13]在颜色传递过程中,将红外图像中冷、热区域(目

标)按比例增强,达到在染色图像中增强目标的目的。近几年,Toet 团队发表了基于颜色查找表映射的染色技术最新研究成果^[14-17],但其算法仍然基于 2003 年提出的颜色传递算法^[10-11]。Toet 选择在 Lab 颜色空间进行颜色统计参数的传递,主要因为它也是一种亮度和色彩分离颜色空间,并且与设备无关。但国内学者李光鑫^[18]研究指出,RGB 与 Lab 的关系是一个非线性的对数变换,计算复杂且效率低;另一方面,Lab 颜色空间中亮度分量动态范围与灰度图像的动态范围不同,因而不能使用高对比度的灰度融合图像直接替换 L 分量形成高质量的染色图像。Toet^[11]借助 HSV 空间来解决这一问题,但增加了算法复杂性,而李光鑫^[18]直接用灰度融合图像和源多波段图像的差异信号构造 YCbCr 分量并在 YCbCr 空间进行颜色传递,取得了很好的染色效果,避免了先形成 RGB 彩色融合图像,再进行重染色的策略,减少了颜色空间变换的次数从而提高了算法效率。

这类基于统计特征的颜色传递过程尽管非常简单,却可以成功地将参考图像的颜色特征传递到目标图像中,并且在实际应用时不用存储参考图像数据,只需要存储其一阶和二阶统计参数即可。但这种方法需要合适的参考图像,如果选择不当则染色图像的颜色将变坏。

此外,按照最终染色图像的视觉感受,染色算法还可分为

1) 伪彩色方法,这类方法依据主观的颜色认识,将多幅源图像构造成能突出源图像特征并符合人眼视觉习惯的彩色图像。染色图像的色彩分布与

场景的真实色彩无关,仅仅是为了突出图像的目标特征,这与医用彩超图像、夜视镜的绿光显示屏等典型应用类似。

2) 假彩色方法,这类方法试图将日光色彩图像(参考图像)的颜色统计属性传递给目标图像,即前述基于颜色传递的染色技术,从而获得接近场景自然色彩分布的染色图像。很显然,参考图像的选择对染色效果影响极大。

1.2 染色模型

对夜视多传感器灰度图像进行染色处理是一种非常有效的彩色增强技术,也可以理解为一种有效的图像融合技术——由多幅灰度图像构造一幅彩色图像的过程,但究其本质,多传感器图像染色就是将场景的多传感器输出(多幅灰度图像)通过变换后映射成伪彩色或假彩色图像的 RGB 分量值的过程,如图 1 给出的染色模型。图 1 描述的染色融合模型中, $V_i(i=1, \dots, N)$ 表示 N 幅多传感器灰度图像,R、G、B 表示最终得到的伪彩色或假彩色图像,中间部分表示染色过程或颜色映射中间步骤,即染色算法。当 $N = 1$ 时,即将灰度图像上的 1 维信息提升到 3 维伪彩色显示,这种情况称之为单幅图像染色或单幅图像伪彩色增强。单幅图像的染色算法因其图像源简单,因而算法较多,且大多数算法较为简单实用,如医学彩超图像、红外热像仪获得表示温度分布伪彩色图像等;当 $N > 1$ 时,表示将多幅不同传感器图像映射成一幅伪彩色或假彩色图像,得到的彩色图像融合了多幅源图像的特征,称之为多传感器图像染色或染色融合。

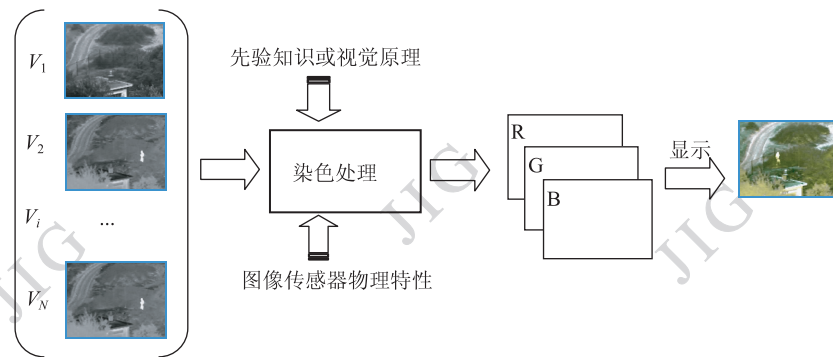


图 1 多传感器图像染色模型
Fig. 1 Flowchart of Coloration Model

1.3 染色算法设计原则

在多传感器染色模型中,染色算法是核心,其任务是根据成像物理特性、场景目标特点和视觉感知

原理等,构造从多传感器图像到伪彩色或假彩色图像 RGB 颜色分量的映射关系。一般来说,染色算法的目标是获得既能保留源图像的丰富细节特征,并

具有视觉友好、接近自然颜色特征的伪彩色或假彩色图像。对大多数应用而言,染色算法的设计应该满足 3 个基本要求:

- 1) 保留源图像所具有的空间信息,如纹理、边缘等,提高背景和目标的对比度;
- 2) 染色图像的颜色应符合人的视觉习惯,尽可能接近场景的日光色彩,能起到增强目标特征和场景态势的可视性;
- 3) 在染色过程中不应引入噪声或虚假、错误的信息。

此外根据不同的应用需求,染色算法还应该满足实时性、图像序列稳定性等需求。

2 染色算法

本文的研究范围属于染色模型中 $N=2$ 的情况,主要针对常用的夜视多波段图像,如红外与微光图像组成的双波段同一场景夜视图像的染色算法展开研究。

2.1 算法概述

选用物理意义明确的亮度与彩色分离的 YCb-

Cr 颜色空间染色夜视多波段图像。为了充分保留多传感器源图像的空间信息,将多传感器融合图像作为亮度分量 Y ,依据传感器物理特性和人的视觉特性,利用源图像的差异性直接构造 Cb 和 Cr 分量,避免了耗时的颜色空间变换;然后应用颜色传递技术,使染色效果接近自然光照固有的色彩。设红外与可见光(或近红外)源图像分别表示为 $IR(i,j)$ 、 $Vis(i,j)$,参考图像表示为 $Rf(i,j)$,其中 (i,j) 为像素坐标。细化图 1 的算法模型,基于 YCbCr 染色算法的一般流程如图 2 所示,相应的算法步骤如下:

- 1) 使用融合算法得到融合图像 $F(i,j)$ 。
- 2) 构造伪彩色 YCbCr 图像:将融合图像作为 Y 分量,用源图像代数运算构造 Cb 、 Cr 分量。
- 3) 颜色传递:(1) 计算伪彩色图像 YCbCr 各分量的均值和标准差;(2) 将参考图像变换到 YCbCr 颜色空间,并计算每个分量的均值和标准差;(3) 使用参考图像的统计参数,对染色图像 YCbCr 各分量应用颜色传递技术,得到假彩色图像。
- 4) 将染色图像从 YCbCr 颜色空间变换到 RGB 空间显示。

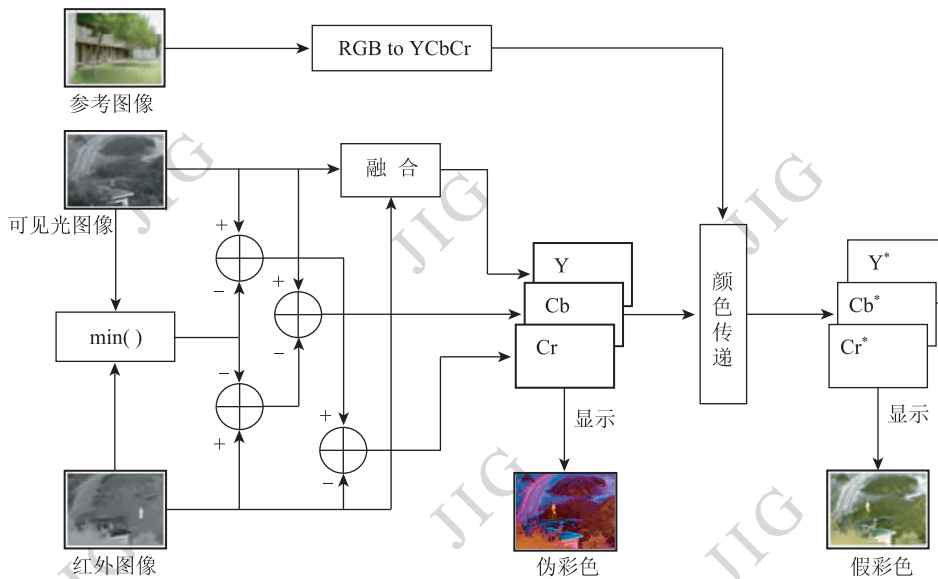


图 2 染色算法框图

Fig. 2 Flowchart of coloration Algorithm

Toet^[11]指出,同一场景的不同传感器图像中,某些细节特征会呈现出相反的对比度,因此将多波段图像直接映射到 RGB 彩色分量可能会严重地降低图像的细节和对比度,使源图像中显著的细节特征在彩色图像中反而会变得不清晰。使用图像融合

方法能更多地保留源图像中的细节信息,将其作为染色图像的亮度分量,可以有效提高伪彩色像图像的对比度,突出源图像中的细节信息,因此步骤 2) 中 Y 分量的构造使用了融合图像。基于多分辨率分析的图像融合算法^[20]因符合人的视觉原理,

能够很好地提取并融合源图像的细节信息,是目前灰度图像融合的主流技术。但因其包含分解和重构过程,计算效率低,难以满足实时系统应用需求。针对夜视染色算法的需求,设计了一种互调制快速融合算法。

2.2 互调制快速融合

信号调制是信号处理领域的一种常用处理技术。对于多传感器系统而言,不同传感器对同一场景、目标获取的图像信号具有不同的幅值、频率等特征,图像信息存在很强的互补性。用一幅源图像以乘积形式调制另一幅源图像对应像素能有效地综合其中的互补信息。遥感图像的融合中,Brovey 方法^[21]就采用了乘积调制的方法。但在多传感器图像融合时,由于源图像中存在像素值接近于 0 的区域,直接的乘积调制将导致与之对应的互补信息丢失。因此简单的乘积调制并不适用。Eckhon 研究猫的视觉皮层时发现,在视觉神经元细胞中,分支感应的调制耦合是一般的、普遍的生物脉冲耦合机制^[22];在神经元的突触输入中,存在着加性耦合和乘积耦合,而不是单一的加或乘。

依据以上认识,设计了互调制快速融合(FMMF)算法。如图 3 算法流程所示,源图像用乘以放大系数后再加上一个偏移项,然后以乘积形式互调制,最后将乘积结果规范化到 $[0,1]$ 即得到融合图像。

图 3 中,源图像 A 和 B(已配准)表示为 $I_A(i,j)$ 和 $I_B(i,j)$,融合图像表示为 $F(i,j)$,其中 (i,j) 为像素坐标,则互调制快速融合算法为

$$F(i,j) = (\delta_A + \beta_A(i,j)I_A(i,j)) \times (\delta_B + \beta_B(i,j)I_B(i,j)) \quad (1)$$

式中,参数 β_A, β_B 为放大系数; δ_A, δ_B 为偏移系数,将式(1)展开为

$$F = (\delta_A + \beta_A I_A) \times (\delta_B + \beta_B I_B) = \delta_A \delta_B + (\delta_B \beta_A I_A + \delta_A \beta_B I_B) + \beta_A \beta_B I_A I_B \quad (2)$$

式中,为简便起见省略了像素坐标 (i,j) , $\delta_A \delta_B$ 称为偏移项, $(\delta_B \beta_A I_A + \delta_A \beta_B I_B)$ 称为加法项, $\beta_A \beta_B I_A I_B$ 称为乘积项。

由式(1)(2)可以看出,源图像经放大和偏移后再进行乘积,综合了加法和乘法的优点,是一种非线性的互调制融合机制。

式(1)中, β_A 和 β_B 决定了源图像在融合结果中加法项的权值和乘积项的强度; δ_A, δ_B 对融合图像的对比度有很大影响。

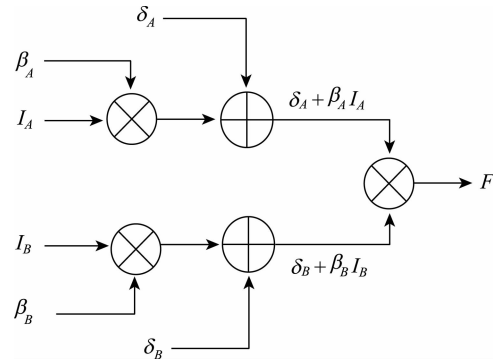


图 3 融合算法流程

Fig. 3 Flowchart of FMMF Algorithm

源图像的互补信息或目标特征在源图像中表现为不同的强度(灰度值),为了在融合图像中突出源图像中强度较高的目标, $\beta_A(i,j), \beta_B(i,j)$ 根据源像素能量计算,即

$$\begin{cases} \beta_A(i,j) = \frac{(I_A(i,j))^2}{(I_B(i,j))^2 + (I_A(i,j))^2} \\ \beta_B(i,j) = 1 - \beta_A(i,j) \end{cases} \quad (3)$$

融合图像一阶和二阶统计值(均值和标准差)表示图像的亮度和对比度特征,在统计特征基础上,确定 δ^A, δ^B ,即

$$\delta_A = \delta_B = \begin{cases} e^{(d-1.0)} & d \geq 1.0 \\ \frac{2}{1+d^{-4}} & d < 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$d = \begin{cases} \frac{\mu_A^2/\sigma_A^2}{\mu_B^2/\sigma_B^2} & \mu_A \geq \mu_B \\ \frac{\mu_B^2/\sigma_B^2}{\mu_A^2/\sigma_A^2} & \mu_A < \mu_B \end{cases} \quad (5)$$

式(4)(5)中, μ 和 σ 是源图像的均值和标准差;取 $\delta_A = \delta_B$ 是为了提高融合算法的适应性,即式(1)中对源图像没有输入次序要求。

2.3 颜色空间模型选择及颜色分量构造

1) 颜色空间模型

在染色模型中,颜色空间的选用对融合算法的设计至关重要。李光鑫^[19]研究表明,在 YCbCr 颜色空间进行颜色传递能取得更好的效果。选用亮度与色彩分离的 YCbCr 颜色空间,其中 Y 指亮度分量, Cb 指蓝色色度分量,而 Cr 指红色色度分量。YCbCr 与 RGB 空间之间的转换关系为

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.402 & 0 \\ 1.000 & 0 & -0.344 & 1 & 0.500 & 0 \\ 1.000 & 0 & 1.772 & 0 & 0.000 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2990 & 0.5870 & 0.1140 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4187 & -0.0813 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (7)$$

2) 构造染色图像的 YCbCr 分量。

将融合图像作为 Y 分量, Cb、Cr 分量借鉴 Toet^[2]方法构造,公式为

$$\begin{pmatrix} Y(i,j) \\ Cb(i,j) \\ Cr(i,j) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(i,j) \\ (Vis(i,j) - IR^*(i,j)) \\ (IR(i,j) - Vis^*(i,j)) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} Vis^*(i,j) &= Vis(i,j) - comm(i,j) \\ IR^*(i,j) &= IR(i,j) - comm(i,j) \\ comm(i,j) &= \min\{IR(i,j), Vis(i,j)\} \end{aligned} \quad (9)$$

式中,将源图像与独有分量线性组合作为 Cb(i,j)、Cr(i,j),目的是为了增加构造后伪彩色图像的色彩对比度和颜色个数,为下一步颜色传递提供丰富的空间信息和光谱特征。

2.4 颜色传递

应用式(8)后,得到的是伪彩色图像,对其使用颜色传递技术^[19]就可以得到接近自然的颜色分布。首先选择合适的参考图像,将其变换到 YCbCr 颜色空间并计算各分量的均值和标准差,同时计算伪彩色图像各分量的均值和标准差,然后将伪彩色图像作为目标图像,使用下面公式实现颜色传递,得到染色后的 Y*、Cb* 与 Cr* 分量。

$$\begin{aligned} Y^*(i,j) &= \frac{\sigma_r^Y}{\sigma^Y} (Y(i,j) - \mu^Y) + \mu_r^Y \\ Cb^*(i,j) &= \frac{\sigma_r^{Cb}}{\sigma^{Cb}} (Cb(i,j) - \mu^{Cb}) + \mu_r^{Cb} \\ Cr^*(i,j) &= \frac{\sigma_r^{Cr}}{\sigma^{Cr}} (Cr(i,j) - \mu^{Cr}) + \mu_r^{Cr} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\mu_r^Y, \mu_r^{Cb}, \mu_r^{Cr}$ 和 $\sigma_r^Y, \sigma_r^{Cb}, \sigma_r^{Cr}$ 为参考图像在 YCbCr 颜色空间的均值和标准差, $\mu^Y, \mu^{Cb}, \mu^{Cr}$ 和 $\sigma^Y, \sigma^{Cb}, \sigma^{Cr}$ 是伪彩色图像 YCbCr 各分量的均值和标准差。经式(10)的线性映射,目标图像的统计参数就变得与参考图像相同,从而实现了颜色传递。

需要指出的是,式(10)本质上是对目标图像各颜色分量像素值使用线性变换(变换参数由参考图像和目标图像的均值、标准差决定),如果参考图像选择不合适,可能会造成各颜色分量的过增强或低对比度,从而导致细节信息的损失。

3 实验及结果分析

3.1 实验数据及对比方案

常用的夜视传感器的成像物理特性有较大区别,如可见光或近红外传感器对场景的反射光响应成像,图像的细节丰富;而红外传感器(中波 3~5 μm 或长波 8~14 μm)响应场景的热红外辐射,图像目标和背景对比度高,目标探测性好,但场景纹理特征不明显,细节模糊。为了评估本文算法的染色效果,实验选择了多组夜视微光图像(低照度相机或像增强器)和红外图像对。图 4 和图 5 给出了两组源图像和实验结果,其中图 4、图 5 的(a)(b)分别为夜视可见光图像(400~700 nm)和中波红外图像(3~5 μm),均来自 Toet^[10-11]算法中的测试图像。有关参考图像的选择,Toet 有较多的论述,这里不再予以展开讨论。

本文算法包含了伪彩色和假彩色两个染色过程,在颜色传递之前构造 YCbCr 颜色分量得到的是伪彩色图像,经过颜色传递后得到的是接近自然色彩的假彩色图像。因此,实验选择 Toet^[3]基于 RGB 颜色空间和 Jang^[8]基于 IHS 颜色空间染色算法对比本文算法伪彩色染色效果,选用 Toet^[10]基于 Lab 颜色空间彩色传递算法对比本文最终假彩色染色效果。图 4 和图 5 的(d)~(h)分别为不同算法的染色结果。

3.2 实验结果分析

对夜视图像的染色效果,主要从视觉感受角度考察:一是染色图像整体亮度、对比度;二是源图像中目标特征的增强效果,三是染色图像颜色分布的视觉舒适性或与真实场景颜色的接近程度。

1) 伪彩色实验结果

图 4 和图 5 中(d)(e)(f)分别为 Toet^[3]算法、Jang^[8]算法和本文算法得到的伪彩色图像。可以看出,本文算法充分利用了 Cb 蓝色色度分量和 Cr 红色色度分量的属性,染色后得到了红色前景和蓝色背景的染色图像,色彩丰富,整体的亮度对比度高;由于 Y 分量的构造使用了互调值融合算法,源图像的空间信息在染色图像中得到充分表达,细节特征突出,而且场景中的目标也被有效增强;此外,本文算法能够获得更好的颜色分布,纹理细节的动态感和层次感强。相比之下,Toet^[3]方法和 Jang^[8]方法的染色效果表现为对比度低,色彩较单一、目标不突出,细节和层次感表现不足,整体视觉舒效果不够理想。

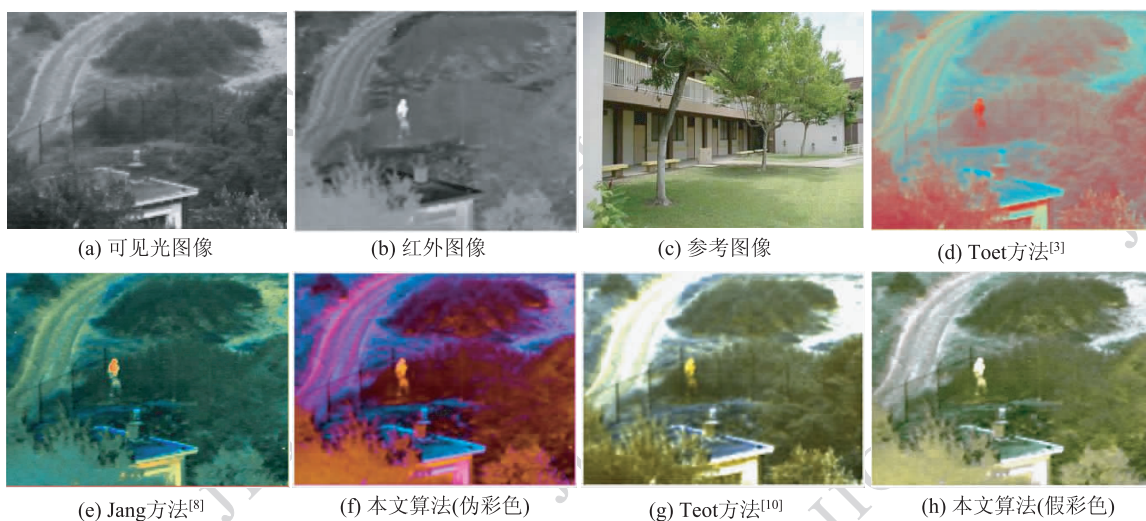


图 4 不同染色算法实验结果
Fig. 4 Results of the different coloration methods

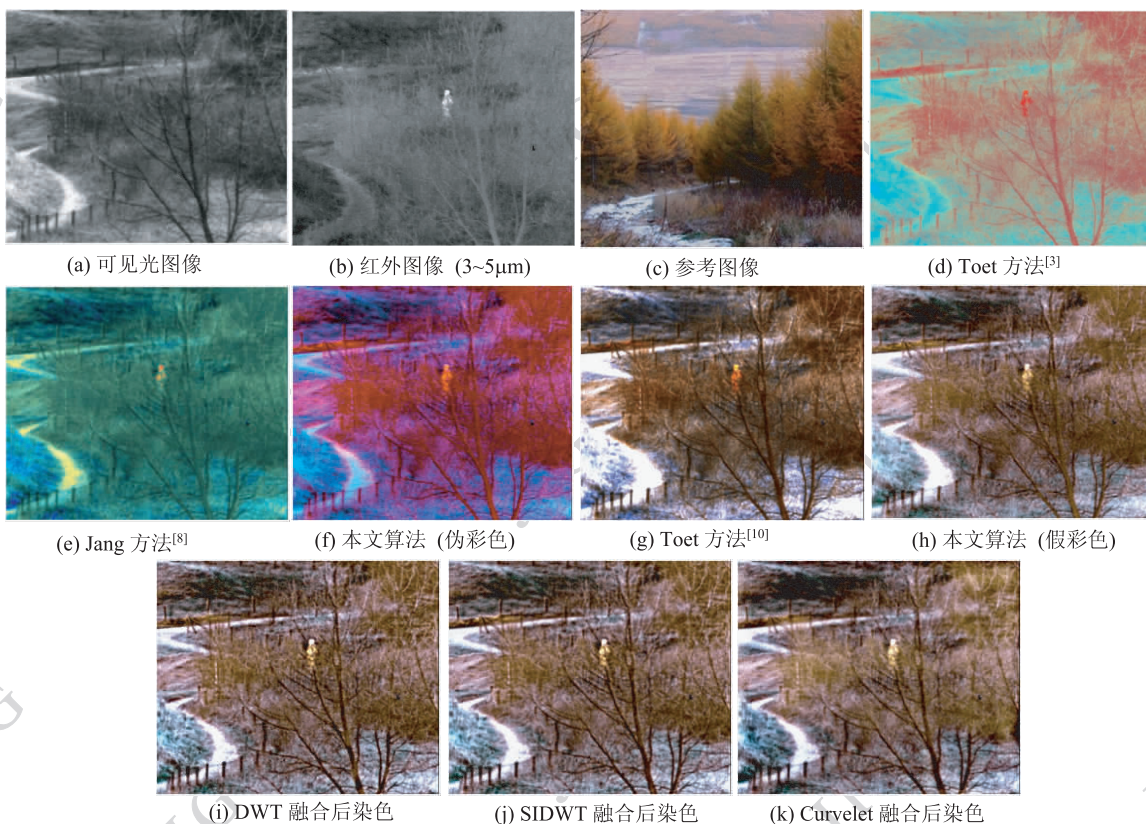


图 5 不同染色算法实验结果
Fig. 5 Results of the different coloration

2) 假彩色实验结果

本文算法对伪彩色图像(图 4(f)和图 5(f))应用颜色传递中之后得到的假彩色图像(图 2(h)、图 3(h))也有很好的表现。Teot^[10]算法在 Lab 颜色空间进行应用色彩传递,如前所述,由于使用了非

线性的颜色变换关系(RGB 与 Lab 变换关系),应用颜色传递后,出现了过增强现象,如图 4(g)和图 5(g)中的道路表现为耀眼的白光,导致纹理细节丢失,这也是基于统计参数线性变换颜色传递的主要问题。与 Teot^[10]算法结果相比可以看出,本文算法

得到的染色图像场景细节更丰富,颜色分布更自然更舒适,目标也更突出,红外特征(高温、低温目标)在染色图像中体现的更充分,如图 5(h)中树丛、屋顶和行人。

3.3 实时性应用前景

本文算法的染色过程中,计算量最大当属构造 Y 分量的融合过程。互调值融合与目前广泛使用的多分辨率分析融合相比,由于没有复杂的分解重构变换过程,算法效率将极大提高。为了说明这一点,实验还使用了小波(DWT)^[23]、移不变小波(SID-WT)^[24]、曲波(Curvelet)^[25]等基于多分辨率分析的融合方法构造 Y 分量,图 5(i)(j)(k)为最终染色结果,其中融合规则均使用了基于区域活性和匹配测度的规则。可以看出,本文使用互调值融合构造 Y 分量,得到染色效果从视觉质量上来看不低于多分辨率分析融合算法。实际上,互调值融合图像的对比度、熵、互信息等衡量空间信息的评价指标也优于小波等多分辨率分析的融合算法,但互调值融合在效率上比小波融合低一个数量级即 10^{-1} ,比曲波融合低 2 个数量级即 10^{-2} (鉴于篇幅限制,详细实验分析请参阅文献[26])。

本文提出的将互调值融合与直接构造 YCbCr 颜色分量相结合的染色算法,在 Matlab7.0 环境下(计算机配置 CUP: Intel Pentium 3.2 GHz,内存: 2 GB),算法实现未做优化时,输入一组 640×480 像素的图像仅仅运行 0.08 s,能满足实时系统的应用。

4 结 论

本文分类总结了现有染色算法,给出了染色融合模型和算法设计原则。在此基础上,提出了一种基于 YCbCr 颜色空间、结合快速融合与色彩传递技术的双波段染色算法。算法采用了亮度彩色分离的彩色空间模型,将双波段融合图像作为亮度分量,使染色图像充分保留了源图像的空间信息和目标特征,构造染色图像 Cb、Cr 分量时将源图像按同等重要性赋予其色彩属性,然后通过染色技术后,获得了接近自然色彩并且细节、特征视觉良好的染色图像。此外,由于设计了互调制快速融合并直接在 YCbCr 颜色空间构造颜色分量,因此染色算法既能保留源图像的丰富细节特征,仍具有较高效率,能满足实时系统的应用需求。由于目前染色技术的研究和应用

仍处于起步阶段,对染色机理、颜色空间模型的应用、颜色传递技术等是后续深入研究的重点。

参考文献(References)

- [1] Xu H, Wang X J. Applications of multispectral/hyper spectral imaging technologies in military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 14-17. [许洪, 王向军. 多光谱超光谱成像技术在军事上的应用. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 14-17.]
- [2] Waxman A M, Fay D A, Gove A N, et al. Color night vision: fusion of intensified visible and thermal IR imagery [C] // *Proceedings of SPIE*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 1995, 2463: 58-68.
- [3] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(3): 650-658.
- [4] Waxman A M, Gove A N, Fay D A, et al. Night vision: opponent processing in the fusion of visible and ir imagery [J]. *Neural Networks*, 1997, 10(1): 1-6.
- [5] Waxman A M, Aguilar M, Fay D A, et al. Solid-state color night vision: fusion of low-light visible and thermal infrared imagery [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, 11(1): 41-60.
- [6] Huang G H, Ni G Q, Zhang B. Visual and infrared dual-band false color image fusion method motivated by Land's experiment [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(2): 027001-1-10.
- [7] Huang G H, Ni G Q, Zhang B. Land's experiment based false color fusion method for visual and infrared images [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 98-101. [黄光华, 倪国强, 张彬. 基于 Land 实验的可见红外伪彩色图像融合方法. *光学技术*, 2007, 33(1): 98-101.]
- [8] Jang J H, Ra J B. Pseudo-color image fusion based on intensity-hue-saturation color space [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*. Washington DC, USA: IEEE Computer Society, 2008: 366-371.
- [9] Chen Y C. Research on multi-source image fusion algorithms [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006: 83-93. [陈玉春. 多元图像融合算法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 83-93.]
- [10] Toet A. Color the night: applying daytime colors to nighttime imagery [C] // *Proceedings of SPIE*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2003, 5081: 168-178.
- [11] Toet A. Natural color mapping for multiband nightvision imagery [J]. *Information Fusion*, 2003, 4(3): 155-166.
- [12] Zheng Y F, Essock E A. A local-coloring method for night-vision colorization utilizing image analysis and fusion [J]. *Information Fusion*, 2008, 9(2): 186-199.
- [13] Yin S F, Cao L C, Yang H, et al. Color contrast enhancement method to improve target detectability in night vision fusion [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(4): 281-

284. [殷松峰,曹良才,杨华,等. 提高夜视融合目标可探测性的颜色对比度增强方法[J]. 红外与毫米波学报,2009,28(4):281-284.]
- [14] Hogervorst M A, Toet A. Method for applying daytime colors to nighttime imagery in realtime [C]//Proceedings of SPIE. Bellingham, WA, USA; SPIE, 2008, 697403:1-9.
- [15] Toet A, Hogervorst M A. Towards an optimal color representation for multiband nightvision systems[C]// Proceedings of The 12th International Conference on Information Fusion. Washington DC, USA; IEEE Computer Society 2009, 1:1417-1423.
- [16] Hogervorst M A, Toet A. Presenting nighttime imagery in daytime colours[C]// Proceedings of The 12th International Conference on Information Fusion. Washington DC, USA; IEEE Computer Society, 2008, 1:1-8.
- [17] Hogervorst M A, Toet A. Fast natural color mapping for nighttime imagery [J]. Information Fusion, 2010, 11(2):69-77.
- [18] Li G X, Xu S Y, Dong J H. Architecture optimized version color transfer based fusion method [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(1):213-218. [李光鑫,徐抒岩,董吉洪. 结构优化型颜色传递融合方法[J]. 电子学报, 2011, 39(1):213-218.]
- [19] Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, et al. Color transfer between images [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5):34-41.
- [20] Hu X L, Shen J. Algorithm on multiresolution remote image fusion with watershed segmentation[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(5):820-823. [胡学龙,沈洁. 利用分水岭分割的多分辨率遥感图像融合算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(5):820-823.]
- [21] Pohl C, Van G J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(5):823-854.
- [22] Johnson J L, Padgett M L. PCNN models and applications [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1999, 10(3):480-498.
- [23] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor image fusion using the wavelet transform [J]. Graphical Models and Image Processing(S1524-0703), 1995, 57(3):235-245.
- [24] Rockinger O. Image sequence fusion using a shift-invariant wavelet transform [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Washington DC, USA; IEEE Computer Society, 1997:288-291.
- [25] Li Y F, Fan Y, Li H Z, et al. Infrared and color visible image fusion algorithm using Curvelet transform [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(11):186-189. [李郁峰,范勇,李绘卓,等. 基于 Curvelet 变换的红外与彩色可见光图像融合算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(11):186-189]
- [26] Li Y F, Feng X Y, Fan Y, et al. A fast multi-sensor image mutual modulation fusion algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(08):117-124. [李郁峰,冯晓云,范勇,等. 多传感器图像互调制快速融合[J]. 光电工程, 2011, 38(08):117-124.]