

〈综述与评论〉

## 双色中波红外成像融合技术的研究进展

蔺素珍<sup>1</sup>, 杨风暴<sup>2</sup>, 周萧<sup>2</sup>, 李伟伟<sup>2</sup>

(1. 中北大学电子与计算机科学与技术学院, 山西 太原 030051; 2. 中北大学理学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 双色中波红外成像是红外多波段探测研究的重要分支, 以双色中波成像及其图像处理为线索, 按照“探测—成像—融合”的思路, 从双色中波探测器研制、探测成像应用、成像特性分析和图像融合4个方面分析了双色中波红外成像融合技术的研究现状, 指出了双色中波图像融合研究中存在的问题及其原因, 提出了在双色中波红外图像差异特征形成机理研究基础上, 探索差异特征驱动的多级融合方法、融合工程化及建立新的图像融合评价方法的发展思路。

**关键词:** 红外成像; 双色中波; 成像特性; 融合方法

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2012)04-0217-07

## Progress on Fusion Technology for Imaging of Dual-color Mid-wave Infrared

LIN Su-zhen<sup>1</sup>, YANG Feng-bao<sup>2</sup>, ZHOU Xiao<sup>2</sup>, Li Wei-wei<sup>2</sup>

(1. School of Electronic and Computer Science & Technology, North University of China, Taiyuan 030051 China;

2. School of information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** Dual-color mid-wave infrared imaging is an important branch of researching the detection of infrared multi-band. With the process of dual-color mid-wave infrared imaging as a clue, according to the thought of "detecting - imaging - image fusion", a series of new researching findings and applications in the fields of dual-color mid-wave are summed up in this paper from the aspects of the development of dual-color mid-wave infrared detector, the application of infrared detection, the analysis on imaging characteristics, and image fusion, as well as some problems in researching and their causes are pointed out. Finally, the future trends are listed, which are exploring differences in feature-driven multi-level fusion method, fusion engineering and creating a new image fusion evaluation system based on the formation mechanism of imaging different characteristics between two sub-bands of MWIR.

**Key words:** infrared imaging, dual-color mid-wave infrared, imaging characterizations, image fusion

### 0 引言

多色、多光谱是当前红外探测的重点, 双色化是多色化研究的基础。本文的双色中波红外成像是将红外中波段3~5 μm划分为两个更窄的波段分别成像, 即在被动热红外成像中利用同一探测器同时获取同一目标和背景的两个细分波段图像信息。

双色中波红外探测在国外已经走向工程应用领域<sup>[1]</sup>, 如法国的 Sofradir 公司报道其新推出的双色中波红外探测器能自动配准、显著提高目标识别

能力<sup>[2]</sup>。尽管如此, 双色化的探测图像还需要融合才能获得更精确、更可靠的信息<sup>[3]</sup>, 但目前双色中波红外图像融合研究一般是依据先验知识, 假设图像之间的差异特征是已知的, 在此基础上进行融合建模, 实际上, 在真实的目标检测中, 双波段图像的差异特征很难完全事先有效确立, 是成像过程各种因素的综合反映, 具有复杂、动态和不确定性, 这时“基于先验估计进行融合”就变得无能为力, 很难满足目标检测对图像融合的实时化和工程化需求。因此有必要对双色中波红外成像融合技术进行

收稿日期: 2011-06-24      修返日期: 2012-03-21

作者简介: 蔺素珍 (1966-), 女, 山西灵石人, 副教授, 博士研究生, 主要研究领域为红外信息处理。E-mail:lsz@nuc.edu.cn.

通信作者: 杨风暴 (1968-), 男, 山西临汾人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为红外信息处理。E-mail:yangfb@nuc.edu.cn.

基金项目: 山西省研究生创新项目 (20103082); 国家自然科学基金项目 (61171057); 山西省自然科学基金 (2011011015-1)。

深入探讨。本文以双色中波成像及其图像处理为线索,按照“探测—成像—融合”的思路,综述了国内外在双色中波领域的系列最新研究成果,重点结合作者课题组在双色中波红外图像融合研究中取得的成果和面临的挑战分析了目前研究和应用中存在的问题,提出了未来的发展趋势。

## 1 双色中波红外成像融合技术研究现状

### 1.1 双色中波的提出

在上世纪90年代初的第一次海湾战争中,美军发现工作于单一波段的红外热探测器经常会受到背景等热杂波信号干扰,在昼夜交替时刻,目标和背景的探测信号差异很小(处于不可用状态),于是推动了多波段(即多色)、多光谱成像研究,既包括拓宽光谱波段,也包括把光谱波段划分为更细致的波段,以获得目标的“彩色”热图像,从而更丰富、更精确和更可靠地获取目标信息<sup>[3]</sup>。与此同时,双色中波红外成像的研究在国外出现了一些报道,如Milton L.Noble等提出用中波的两个窄波段对同一场景成像<sup>[4]</sup>、CEA-LETI于1995年启动了双波段探测器研究项目并且在1998年第一次基于nnp技术制造了用于双色中波的二极管,一直到现在,双色红外探测器研发仍然是美国、法国等发达国家探测研究和开发的核心<sup>[5-8]</sup>。由于中波段是探测高温目标的最佳工作波段且具有较强的穿雾能力,在探测森林火灾、火山爆发、飞机尾喷气流、爆炸气体等方面广泛应用,特别是随着微小卫星平台对体积小、功耗低、高空间分辨率和时间分辨率红外探测器需求的增加<sup>[9]</sup>,中波红外成像应用迅速发展,据报道许多大规模焦平面阵列都工作在中波红外波段<sup>[10]</sup>。

### 1.2 双色中波红外成像融合技术研究进展

与双色中波红外成像融合相关的领域主要有红外探测器研制、双色/多色探测及多光谱超光谱成像应用、双色中波成像特性分析和双色中波图像融合等几方面。

#### 1.2.1 双色探测器研制

探测器研制一直是双色化/多色化成像研究的重点,如美国的Rockwell/Boeing、DRS、Lockheed等公司开发出了双色中波探测器、德国的AIM和英国的BAE也加紧研发HgCdTe第三代焦平面器件、法国CEA-LETI和Sofradir最近十余年一直把双色探测器的研发作为其核心工作<sup>[3]</sup>;国内也开展了HgCdTe双色焦平面的研制<sup>[11]</sup>。焦平面材料研制无疑是其中发展最迅速的分支之一<sup>[12-14]</sup>,如法国的Leti/LIR给出了双色焦平面的研制工作报告、对不

同焦平面材料在两个细分中波段的特性研究也相当深入<sup>[15-17]</sup>。随着InSb、HgCdTe、量子阱等新型材料和技术的推出,法国2009年研发出640×512的双色中波探测器;美国2007年之后陆续推出1024×1024像素双波段量子阱红外光子探测器焦平面阵列和纹波量子阱大规模焦平面阵列,并开始研制2560×2560元超大规模中波红外焦平面阵列<sup>[18,19]</sup>。其他发达国家也相继投入双色和三色探测器的研制,其中焦平面阵列正向着大幅面、低间距、非制冷、高分辨率发展<sup>[3,14]</sup>。我国上海技术物理研究所也已经对双色中波成像技术展开了研究<sup>[20]</sup>。超晶格技术的出现既使得HgCdTe等红外技术面临新的挑战也给红外探测器研制带来了新的机遇,图1是利用基于超晶格技术的288×384InAs/GaSb双色成像仪拍摄的双色中波叠加图像,红色(对应第二细分波段)显示出CO<sub>2</sub>的排放,而蓝色(对应第一细分波段)则反映出水蒸气和云层的瑞利散射情况<sup>[21]</sup>。为此,美国已于2009年制定了一个四年计划来开发生产高质量的II型超晶格多波段焦平面阵列<sup>[22,23]</sup>。



图1 双色中波叠加图像

Fig.1 Superimposed image of dual-color MWIR

#### 1.2.2 双色/多色探测成像应用

双色探测器已在一些高端场合获得了应用。如2005年,荷兰TNO国防、保密与安全机构在中波红外两个细分波段找到了最佳组合方法,取第二个波段的4.49~4.56 μm和第一个波段的3.5 μm附近的一个窄带成像,不但可以提高红外传感器的探测距离,而且还可以使红外传感器能探测到导弹的尾焰<sup>[1]</sup>。2006年美国研制了320×256像素并行记录同时读出双波段QWIP焦平面阵列红外相机<sup>[24]</sup>,由于集成像素安置在同时读出双波段焦平面阵列上,不仅降低了对光学系统的要求、还降低了对体积和功率等的要求,而且利用不同波段信息可以提供未知热辐射系数的目标的绝对温度,这对于目标和伪目标的识别十分重要。南非“矛枪”导弹武器系统是以法国“海响尾蛇”导弹为蓝本进行研仿,导弹采用的是双色中波红外导引头。在正常作战中,一旦红外导引头截获目标,舰面火控雷达即可不管该导弹,由导弹自主完成攻击。而舰面火控雷达可以马上跟踪下一个目标,辅助下一枚导弹攻击目标,

提高了抗击饱和攻击的能力<sup>[25]</sup>。近期国内外又开展了多光谱、超光谱甚至高光谱成像探测研究,如美国军方的“联合多光谱计划(JMSP)”、加拿大的可见、近红外超光谱成像仪、我国天津大学通过“多光谱、超光谱成像探测关键技术研究”<sup>[26]</sup>探索四波段成像等,用超光谱成像技术进行地雷探测、毁伤效果评估、弹道导弹助推段分辨等也取得了显著的效果。但是,无一例外,成像仪均没有实现对图像的融合,对探测到的多路图像一般需要分别进行视频解码、图像增强等处理、再视频编码、输出才能用于目标识别。在实时监控中,这就要求飞行员/指挥员不得不连续地在多路信号之间进行频繁切换并迅速决断,如此高强度的、目不暇接的工作必然导致漏判、误判产生。因此,实时融合是多色化探测应用的迫切需求。

### 1.2.3 双色中波红外成像特性的分析

鉴于红外探测的重要性,国内外学者对红外成像特性已经做了大量研究,建立了典型目标像坦克、喷气式飞机、火箭、火炮、建筑物等的红外辐射模型及大气的传输模型,并进行了仿真<sup>[27-29]</sup>。其中也包括对中波 $3\sim 5\mu\text{m}$ 成像的建模及仿真。

但是尚未检索到对两个细分中波段成像的建模与仿真,不过研究者已经开始关注双色中波成像特性及其差异。Smith等<sup>[30]</sup>在2004年研究第三代双色HgCdTe凝视型焦平面时,给出了双色中波焦平面的两个细分波段的光子响应曲线和有效量子率曲线,反映了两个细分波段成像响应的差异性,并提供了双色中波的成像结果。Moyer等人<sup>[31]</sup>对比分析了车辆和背景在MWIR1和MWIR2之间的信息差异;Joseph P. Havlicek等人<sup>[32]</sup>利用滤光片和单色的中波成像仪PV320进行了 $3.4\sim 4.1\mu\text{m}$ 、 $4.5\sim 5.3\mu\text{m}$ 两个中波细分波段的成像实验,初步讨论了两个波段成像的对比特点。Shepherd等<sup>[33]</sup>以地面停车场为例、Srikant Chari等<sup>[34]</sup>以地下停车场和石油探测为例分别对两个细分波段成像差异进行了对比。戎志国等<sup>[35]</sup>在研究火情遥感的大气传输特性时发现在中波 $4.34\sim 4.76\mu\text{m}$ (对应第二细分波段)的光谱辐射亮度比 $3.5\sim 4.0\mu\text{m}$ (对应第一细分波段)更强。作者课题组结合融合方法研究对一些典型目标的双色中波红外成像特性也进行了分析<sup>[36,37]</sup>,得到了两个细分波段成像过程在以下方面的差异:

1) 对应的峰值温度范围不同:以 $3.4\sim 4.1\mu\text{m}$ 和 $4.5\sim 5.3\mu\text{m}$ 为例,根据维恩位移定律,可以计算两个细分波段峰值波长对应的黑体温度范围,分别为 $852.3\sim 706.6\text{K}$ 、 $644.0\sim 546.8\text{K}$ ,最高最低温

度分别相差 $145.7\text{K}$ 和 $97.2\text{K}$ ,前者范围宽,后者范围窄。2) 目标的辐射特性不同:相同或不同的目标在两个细分波段的辐射特性是不同的,其辐射具有差异性和互补性。3) 光谱透过率不同:前者光谱透过率变化较小,平均值较大;后者光谱透过率变化较大,平均值较小。因此,在前一个细分波段受大气影响较小,成像效果更好。4) 受太阳辐射的影响不同:在第一个细分波段的成像中具有较多的太阳辐射和反射,在第二细分波段中更多的是景物自身的辐射和对其它辐射的反射。5) 探测器在两个波段的成像特性不同,例如HgCdTe焦平面阵列在中波两个细分波段有效量子效率的直方图特性是不同的<sup>[30]</sup>。

上述关于双色中波成像特性及差异的研究虽然涉及到了成像特性的多个方面,但是仍然没有深刻揭示从两个波段成像特性差异到图像差异特征的形成机理,所以其研究是局部的、侧重定性的。针对这个问题,最近,课题组通过对双色中波红外热成像过程建模,得到了不同温度下双色中波红外点目标成像在灰度值、目标受环境影响和目标背景对比度等三个方面存在的差异,为面目标、大目标研究及后续的图像特征提取、融合规则制定、权重系数确定等提供依据。

### 1.2.4 双色中波红外图像融合

多色多光谱红外探测离不开图像融合<sup>[38-40]</sup>,双色中波也不例外,随着双色中波红外探测器的成功研制,对双色中波红外图像的融合研究也同步展开<sup>[41-43]</sup>,如文献[41]提出了将景物是火力发电厂的两幅双色中波图像分别送入R、G通道的彩色映射融合方法,以获得关于景物更清楚的图像(如图2)。课题组利用二维离散小波包变换<sup>[44]</sup>、伪彩色增强<sup>[45]</sup>、SVT<sup>[46]</sup>(如图3)和基于人眼中心-环绕对抗受域神经网络<sup>[47]</sup>对两幅细分中波图像进行了融合,融合结果经主客观评价都比中波红外直接成像的结果更好(如图4),其中基于SVT的融合方法不仅速度快而且对于消除太阳照射饱和区效果也较好。在此基础上,针对被噪声淹没的双色中波红外图像,提出了基于阈上随机共振的弱信号双色中波红外图像融合方法<sup>[48]</sup>。尽管如此,目前,双色中波红外图像融合通常仍然是借用其他波段如红外与可见光图像融合、红外中波与长波图像融合等方法或局部改进来进行。如前所述,这些方法一般都是依据先验知识,假设图像之间的差异特征是已知的,在此基础上研究融合建模,确实能够自圆其说,但在复杂、动态且具有不确定性的场景中,这种“基于先验估

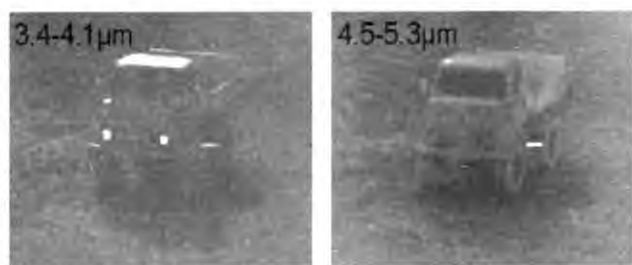
计进行融合”的研究方法至少面临两个挑战：一是真实场景的差异特征和预估差异特征不可能完全一致，所以，原有融合算法的效果难以保证；二是时效性，探测态势瞬息万变，而原有的“探测信号—视频编码—输入计算机—视频解码—融合处理—再视频编码—输出”模式，无法完成实时处理，尤其是对双路动态视频图像而言，图像的帧间变化更为复杂，事先确定的融合模型和算法很难发挥有效作用，不可避免地出现许多失效的情况。



(a)MWIR1 图像 (b)MWIR2 图像 (c)彩色映射图像

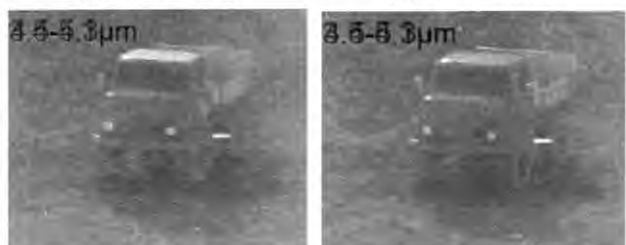
图2 双色中波彩色映射融合图像

Fig.2 Fused images by color mapped of dual-color MWIR



(a)MWIR1 图像

(b)MWIR2 图像



(c)小波包变换融合图像

(d)SVT 融合图像

图3 课题组的双色中波融合图像

Fig.3 Fused images of dual-color MWIR by our group



(a)MWIR1 图像 (b)MWIR2 图像 (c)伪彩色增强图像

图4 SVT 融合后的双色中波伪彩色增强图像

Fig.4 Pseudo-color enhancement of fused image by SVT in dual-color MWIR

## 2 双色中波红外成像与融合技术发展趋势分析

如前所述，由于双色中波红外探测与图像融合处理相分离以及目前图像融合研究在方法论方面的局限，导致了双色中波红外图像融合的非实时性问题和融合未能工程化两个问题。要想解决这两个问题，未来需要在以下方面取得突破：

### 2.1 揭示双色中波红外图像差异特征形成机理

由于融合的有效性取决于对原图像间差异特征（即反映同一目标两个细分波段图像信息差异的显性或隐性特征量）的综合利用程度，而图像的差异特征是在成像过程中形成的，是目标在两个细分波段红外辐射特性、红外辐射的大气传输特性、光学系统透射特性、器件响应特性等（统称为成像特性）共同作用的结果，所以，深入研究从成像特性到图像特征的演变规律，建立双色中波红外成像特性到图像差异特征的演化模型，揭示双色中波红外图像差异特征及其形成机理，一方面可以为双色中波红外图像融合提供理论指导，另一方面也可以为双色中波红外图像融合工程化和多色多光谱图像融合研究奠定基础。这就要求建立典型目标的双色中波红外辐射特征模型、红外辐射的大气传输模型、光学系统透射模型、器件响应模型和双色中波红外图像差异特征描述模型等，并通过系列模型建立仿真图像。其中成像特性差异和图像差异特征之间存在的一对多、多对一、多对多的复杂映射关系是研究难点。根据课题组前期的探索，可能性理论、随机集理论等多源不确定性信息处理理论<sup>[49, 50]</sup>有望给该难点的突破提供指导。

### 2.2 多级综合融合方法研究

表面上看，前面述及的双色中波红外图像融合研究所面临的问题，其原因是图像差异特征是变化的，而融合方法是固定的，后者没有随着前者的变化类型、变化幅度而变化。本质上讲，是由于图像差异特征变化是复杂动态的，具有不确定性，且融合方法的优势性能具有很大的模糊性，没有建立差异特征与融合算法之间的集值映射关系，必然无法根据差异特征融合需求得到具有自适应能力的融合方法。因此，根据融合方法与图像差异特征的依从关系提出融合需求，进而研究融合方法和算法，将有助于提高图像融合的效果和效率。如在前期研究中，我们发现目标和场景在中波第一细分波段受太阳影响比较大，存在受太阳影响使目标细节更清楚和过饱和导致目标细节模糊两种情况，融合处理时区别对待才可以得到较好的融合效果<sup>[46]</sup>。可见一个有效的双色中波红外图像融合研究思路是：在双色中波红外成像特性差异研究的基础上，研究图像特

征及其提取方法、阐明融合需求,进而提出双色中波图像多级综合融合方法,才能进行复杂场景探测时的实时或者自适应处理。这种融合研究的技术路线如图5所示。

双色中波红外图像多级综合融合研究的难点是两个类集之间的复杂映射关系建立,首先需要对几种常用的类集组合规则进行统一表示和度量,并针对不同需求建立新的或扩展的组合规则,以解决相关/冲突条件下的融合决策问题。其次,研究用于描述对象多种变化属性的类集变量的统计特性,并基于模糊信息和概率信息等,建立描述对象类集变量的动态模型及观测模型,对多源不确定信息进行统一描述与度量、进而研究相应的融合算法。

### 2.3 双色中波红外图像融合的工程化

双色/多色红外探测尽管取得了成功,但双色/多色图像融合作为信息处理的一个分支仍停留在实验研究阶段,很少作为红外探测的一部分来综合考虑。只有把双色中波红外成像特性与图像融合结合起来,探索有一定普适性的多级多算法融合模型,这就需要根据差异特征的互补需要、借助图像处理研究的最新成果来构建新算法<sup>[51,52]</sup>,并简化融合算法才能硬件化。将硬件化的融合器嵌入在成像仪中方可实现融合自动化和工程化。其关键是研发基于SoC的双色中波红外图像融合处理系统。目前基于SoC的红外图像处理系统呈快速发展的趋势,北京理工大学等已经作了许多有益的工作<sup>[53,54]</sup>。

### 2.4 双色中波图像融合评价方法研究

实时性、工程化的双色中波红外图像融合是否

可行、效果如何,涉及到对融合图像的评价问题。而图像评价目前还没有统一的标准,通常是对不同融合方法的结果进行比较,得到的只是相对性数据(即一种方法比另一种方法好),不足以说明是否达到了所期望的效果;而从双色中波成像特性及图像差异特征出发,则可以进行更客观的评价。

### 3 结束语

针对双色中波红外探测与图像融合处理相分离所导致的融合非实时性问题和工程化需求问题,提出如下解决思路:从分析两个细分波段成像特性差异入手,深刻研究从成像特性到图像特征的演变规律;建立双色中波红外成像特性差异到图像差异特征的系列演化模型,揭示双色中波红外图像差异特征的形成机理,进而阐明融合需求,在此基础上研究多级融合方法,简化图像融合算法用于硬件化,研发基于SoC的双色中波红外图像融合系统,将有助于双色中波红外图像融合实时处理和实现工程化。需要指出的是:本文所讨论的双色中波红外图像融合属于单源的图像融合,不涉及图像配准的问题。但是对异源图像融合而言,图像配准算法的实时性和硬件化也是图像处理工程化的难点之一。

#### 参考文献:

- [1] Phillip NEELE .Two-color infrared missile warning sensors[C]/SPIE, Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance(ISR) Systems and Applications II, 2005, 5787: 134-145.
- [2] <http://www.janes.com/events/exhibitions/eurosaty2010/sections/daily/day1/multiple-wavelength-ir-de.html>.

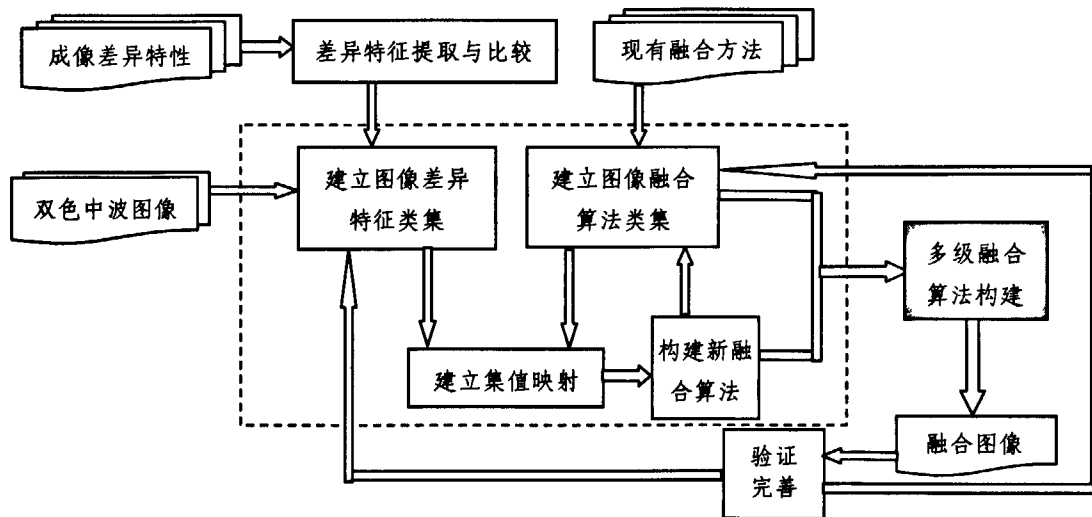


图5 双色中波红外图像多级综合融合示意图

Fig.5 Framework of multi-level integrated fusion of dual-olor MWIR images

- [3] Yann Reibel, Fabien Chabuel, Cedric Vaz, et al. Infrared dual band detectors for next generation [J]. *SPIE*, 2011, **8012**: 381-383.
- [4] Milton L.Noble, Liverpool N.Y. Infrared imager forming two narrow waveband images of the same object field. United States Patent(19) US005258618A.[P].
- [5] John T. Caulfield. Next generation IR focal plane arrays and applications[C]//*Proceedings of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, IEEE*. 2003, 0-7695-2029-4/03.
- [6] P. Ballet, P.Castelein. Demonstration of a 25 $\mu\text{m}$  pitch dual band HgCdTe infrared focal plane array with spatial coherence [J]. *SPIE*, 2005, 595703.
- [7] G.Destefanis, P.Ballet. Bi-color and dual-band HgCdTe infrared focal plane arrays at DEFIR[J]. *SPIE*, 2006, **6206**(2): 1-15.
- [8] Yann Reibel, Destefanis G.MCT (HgCdTe) IR detectors: latest developments in France [J]. *SPIE*, 2010, 78340M.
- [9] 刘琳. 中波红外大相对孔径非制冷热像仪光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2010: 9-32.
- [10] 叶玉堂, 刘爽. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社. 2010.: 151-154.
- [11] 叶振华, 周文洪, 胡伟达, 等. 碲镉汞红外双色探测器响应光谱研究[J]. *红外与毫米波学报*. 2009, **28**(1): 4-7.
- [12] M. Kaldirim, S. U. Eker, Y. Arslan, et al. Large-format voltage-tunable dual-color midwavelength infrared quantum-well infrared photodetector focal plane array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(9): 709-711.
- [13] Cabancki W, Breiter R, Mauk H H, et al. Broadband and dual-color high-speed MCT MWIR modules[J].*SPIE*, 2002, **4721**: 174-182.
- [14] A.Rogalski. Infrared Detectors for the Future[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2009, **116**(3): 389-406.
- [15] Vincent Guériaux, Alexandru Nedelcu, Mathieu Carras, etc. Mid-wave QWIPs for the [3-4.2  $\mu\text{m}$ ] atmospheric window[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009(52): 235-240.
- [16] Laffosse E., Baylet J., Chamonal j.p., et al. Inductively coupled plasma etching of HgCdTe using a CH<sub>4</sub>-based mixture[J]. *Journal of Electronic Materials*. 2005, **34**(6): 740-745.
- [17] Manissadjian A, Magli S. Compact Dewar and electronic for large format infrared detectors [J]. *SPIE*, 2011, 801231.
- [18] Zecri M, Maillart P. Advanced ROIC design for cooled IR detectors [J]. *SPIE*, 2008, **6940**: 1-12.
- [19] Pistone F, Tribolet P. Low IR input flux condition operation thanks to MCT e-APD [J]. *SPIE*, 2010, **7660**(2): 1-8.
- [20] 徐向晏, 叶振华, 李志锋等. 中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究[J]. *红外与毫米波学报*. 2007, **26**(3): 165-169.
- [21] Rutz F, Rehm R, Schmitz J, et al. InAs/GaSb super lattice focal plane array infrared detectors: Manufacturing aspects [J]. *SPIE*, 2009, 7298: 1-10.
- [22] R. Rehm, M. Walther, J. Schmitz, et al. Type -II superlattices: the Fraunhofer perspective [J]. *SPIE*, 2010, **7660**: 1 - 12.
- [23] A.Rogalski. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics & Technology*. 2011, **54**(3): 136-154
- [24] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. Towards dualband QWIP focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, **50**, 217-226.
- [25] 文宏. 南非“矛枪”舰空导弹[J]. *舰船知识*, 2007, (10): 48-49.
- [26] 许洪. 多光谱、超光谱成像探测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学. 2008: 12-28
- [27] 张建奇, 王晓蕊. 光电成像系统建模及性能评估理论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 21-50.
- [28] Pieter A.Jacobs.地面目标和背景的热红外特性[M]. 吴文健, 胡碧茹, 满亚辉译. 北京: 国防工业出版社, 2004, 1,22-185.
- [29] 宣益民, 韩玉阁. 地面目标与背景的红外特征[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 19-206..
- [30] E.P.G. Smith, L.T.Pham, G.M.Venzor, etc. HgCdTe focal plane arrays for dual-color mid - and long-wavelength infrared detection[J]. *Journal of Electornic Materials*, 2004, **22**(6): 509-515.
- [31] Steve Moyer, Ronald G. Driggers, Richard H. Vollmerhausen, et al. Information deference between subbands of the mid-wave infrared spectrum[J]. *Society of photo-optical instrumentation engineers*, 2003, **42**(8): 2296-2303.
- [32] Joseph P. Havlicek, Chuong T. Nguyen, Guoliang Fan, et al. Integration of a dual-band IR data acquisition system using low -cost PV320 cameras [C]//*Infrared Technology and Applications XXXII, SPIE*, 2006, **6206**: 1-9.
- [33] F. D. Shepherd, J. M. Mooney, T. E. Reeves, et al. A daptive MWIR spectral imaging sensor [J]. *SPIE*, 2008, **7055**: 1-8.
- [34] Srikant Chari, Carl Halford, Eddie Jacobs, Aaron Robinson. Multispectral infrared image classification using filters derived from independent component analysis [J]. *SPIE*, 2007, 65760B.
- [35] 戎志国, 张玉香, 刘诚, 等. 中波红外火情遥感的大气辐射传输特性[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 589-593.
- [36] 杨风暴. 多波段红外图像目标特征分析与融合方法的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006: 15-66.
- [37] 冷敏. 红外中波细分图像的伪彩色增强研究[D]. 太原: 中北大学, 2010: 20-32.
- [38] Y.Zhou, M.A.Omar. Routines for fusing infrared, visible acquisitions, applied to night vision systems[J]. *International Journal of Optomechatronics*, 2009, **3**(1): 41.
- [39] Li Shutao, Yang Bin, Hu Jianwen. Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion[J]. *Information*

- Fusion*, 2011, 12: 74-84.
- [40] Mourad Zribi. Non-parametric and region-based image fusion with Bootstrap sampling[J]. *Information Fusion*, 2010, 11:85-94.
- [41] James R. Waterman, Dean Scribner. Real-time fused color imagery from two-color midwave HgCdTe IRFPAS[J]. *AD-A400026*, 1998, 1-11.
- [42] Lipchen Alex Chan, Sandor Z. Der, and Nasser M. Nasrabadi. Dual-band FLIR fusion for target detection [J]. *SPIE*, 2002, 4668: 108 (2002).
- [43] U. Adomeit, R. Ebert. Improved target detection by IR dual-band Image Fusion[J]. *SPIE*, 2009, 74810B: 1-8.
- [44] 杨风暴, 倪国强, 张雷. 红外中波细分波段图像的小波包变换融合研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(4): 275-279.
- [45] 杨风暴, 倪国强, 荆绍威. 红外中波细分图像的伪彩色增强[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, 28(2): 97-101.
- [46] 杨风暴, 蔺素珍, 冷敏. 双色中波红外图像的分割支持度变换融合[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(5): 362-366.
- [47] 冷敏, 杨风暴, 齐伟. 基于人眼中心-环绕对抗受域神经网络的红外中波细分图像的融合[J]. *红外技术*, 2009, 31(7): 403-406.
- [48] 蔺素珍, 杨风暴, 吉琳娜, 等. 基于阈上随机共振的弱信号双色中波红外图像融合[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(6): 546-550.
- [49] Wen Chenglin, Xu Xiaobin. A New Unified Description of Multisource - Heterogeneous Information [C]//*Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation*, 2006: 4082-4087.
- [50] 彭冬亮, 文成林, 徐晓滨, 等. 随机集理论及其在信息融合中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2010, 28(11): 2199-2204.
- [51] Satyanadh Gundimada, Vijayan K. Asari, Neeharika Gudur. Face recognition in multi-sensor images based on a novel modular feature selection technique[J]. *Information Fusion*, 2010, 11(2): 124-132.
- [52] Yi Zhou, Abedalroof Mayyas, Ala Qattawi, et al. Feature-level and pixel-level fusion routines when coupled to infrared night-vision tracking scheme[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010(53): 43-49.
- [53] 范永杰, 金伟其, 李力, 等. 基于FPGA的可见光/红外双通道实时视频融合系统[J]. *红外技术*, 2011, 33(5): 257-261.
- [54] 曲锋, 刘英, 王健, 等. 红外双波段图像实时融合系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1684-1689.

(上接第204页)

- [5] Mutsumi K, Daisuke S, Masamichi K, et al. Pulsewidth modulation with current uniformization for AM-OLEDs[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2010
- [6] Wang Longyan, Liao Congwei, Liang Yinan, et al. A New Four-Transistor Poly-Si Pixel Circuit for AMOLED[C]. 2010
- [7] 张雷, 吴华夏, 胡俊涛, 等. 一种 OLED 显示器参数温度自适应设计[J]. *光电工程*, 2011, 3(2): 127-131.
- [8] Garditz C, Winnacker A, Schindler F, et al. Impact of Joule heating on the brightness homogeneity of organic light emitting device[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(10): 103506.
- [9] Kuixue Liu, Lihua Chen, Shuxin Liu. Organic Light-Emitting Diodes Life Expectancy Assessment Device[J]. *Chinese Journal of scientific Instrument*, 2009, 30(6): 335-337.