

文章编号:1001-9014(2009)02-0097-05

红外中波细分图像的伪彩色增强

杨风暴¹, 倪国强², 荆绍威¹

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室、仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 北京理工大学 光电工程系, 北京 100081)

摘要:提出了基于 $l\alpha\beta$ 颜色空间变换和小波包变换的红外中波细分波段图像的伪彩色增强方法. 利用 $l\alpha\beta$ 变换将两个细分波段 RGB 彩色映射的伪彩色图像的颜色和亮度信息分离, 通过二维小波包变换得到两个细分波段的融合图像, 将融合图像和颜色信息经过 $l\alpha\beta$ 逆变换形成伪彩色增强图像. 实验结果表明, 同简单彩色映射图像相比, 伪彩色增强图像的局部标准偏差和局部熵都有增加, 从而使图像具有更好的感知效果.

关键词:图像增强; 伪彩色; 中波红外; 细分波段
中图分类号: TN219 文献标识码: A

PSEUDO-COLOR ENHANCEMENT OF IMAGES IN SUBDIVISION BANDS OF MWIR

YANG Feng-Bao¹, NI Guo-Qiang², JING Shao-Wei¹

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement (North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China;
2. Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Pseudo-color enhancement method of sub-band images of mid-wave infrared was presented based on both $l\alpha\beta$ color space transform and wavelet packet transform. The color and luminance information of pseudo-color image obtained by RGB color mapping were separated by using $l\alpha\beta$ color space transform. And the luminance part was replaced by the image fused from two sub-band images by wavelet packet transform, then pseudo-color enhance image was obtained after inverse $l\alpha\beta$ color space transform. The experimental results show that the local standard deviation and local entropy of enhance image are increased by comparing with simple color mapping image, and the image enhancing has good perceptive effect.

Key words: image enhancement; pseudo-color; mid-wave infrared (MWIR); subdivision band

引言

从红外中波段的大气光谱透过率曲线(图 1)可以看出在 $4.1 \sim 4.5 \mu\text{m}$ 左右的大气透过率是非常低的, 其中波段成像中的辐射贡献很小. 为了更加精确, 可以把中波段在 $4.3 \mu\text{m}$ 左右划分成两个细分波段^[1,2]. 从成像的角度来比较而言, 两个细分波段各有特点^[3]. (1) 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. (2) 对应的峰值温度范围不同: 如以 $3.4 \sim 4.1 \mu\text{m}$ 和 $4.5 \sim 5 \mu\text{m}$ 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 145.7K 和 97.2K , 前者范围宽, 后者范围窄. (3) 受太阳辐射的影响不同: 由于太阳辐射到达地面的波段范围一般为 $0.24 \sim 4.0 \mu\text{m}$, 波长小于 $4.0 \mu\text{m}$ 的地物的红外辐射与太阳及地物的反射有关; 超过 $4.0 \mu\text{m}$ 时, 辐射主要来源于地物自身的热辐射. 所以在第一个细分波段的图像中具有太阳的较多辐射和反射, 在第二细分波段中更多的是自身的辐射和对其它辐射的反射. (4) 目标的辐射特性不同: 相同和不同的目标在两个细分波段的辐射特性是不同的, 文献[4]对地面车辆在红外中波段及其细分波段的成像信息差异的对比实验探索, 说明了两个细分波段目标辐射的差异性

收稿日期: 2008-02-27, 修回日期: 2008-09-10

Received date: 2008-02-27, revised date: 2008-09-10

基金项目: 国家 973(51325010402) 资助项目

作者简介: 杨风暴(1968-), 男, 山西临汾人, 教授, 主要从事红外信息处理的研究.

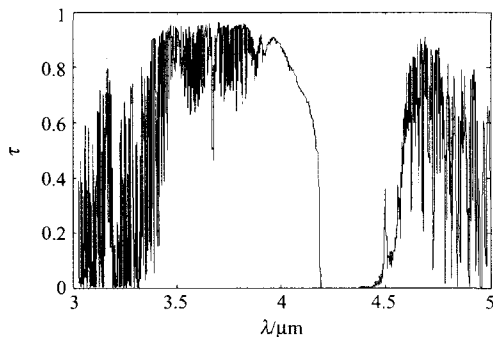


图1 红外中波段大气光谱透过率
Fig. 1 Atmospheric transmission spectrum of MWIR

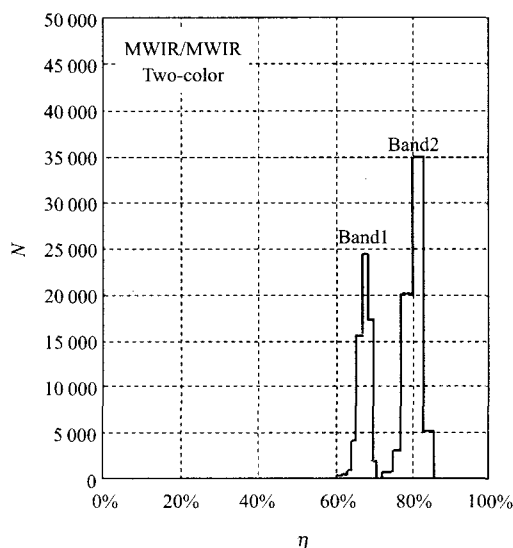


图2 HgCdTe 焦平面阵列中波有效量子效率的直方图
Fig. 2 Histogram plots of effective quantum efficiency for TLHJ HgCdTe FPA

和互补性。(5) 探测器在两个波段的成像特性不同^[5];图2是一种 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^[6],可以看出二者的不同。

因此,将中波段划分为更窄的波段,使成像波段更加精细,可以利用各个细分波段的特点和目标在不同细分波段的特性分别成像,获得各自信噪比高的图像,再通过后处理获得质量更高的图像。

红外图像的增强是提高成像质量的有效手段^[7],中波红外细分后可以获得不同的图像,为图像的伪彩色增强提供了可能。这种伪彩色增强不是像一般红外成像仪上给单幅图像增加绿、蓝等单色调或者利用不同温度对应不同颜色的方法,而是针对多幅图像间的差异性通过多通道颜色映射获得,其效果更加符合人的视觉习惯,且能增强图像的细

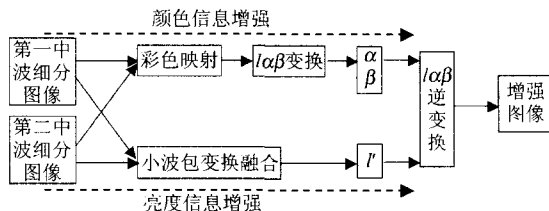


图3 红外中波细分图像彩色增强示意图
Fig. 3 Framework of color enhancement of dual sub-band MWIR images

节信息,提高图像的清晰度,更便于目标探测与识别。为此,本文提出了对两个细分波段图像进行彩色映射,然后进行 $l\alpha\beta$ 颜色空间变换和小波包变换处理的伪彩色增强方法。

1 彩色增强方法

本文提出的中波细分图像的伪彩色增强方法如图3所示。

彩色映射是将两个细分波段图像经预处理分别送入 RGB 颜色空间的三个颜色通道,然后显示出来,这样一方面可得到彩色图像,一方面可以利用颜色及颜色对比度将两个细分波段的差异信息表现出来,提高视觉观察效果。成像系统的目的之一就是尽量得到清晰度高的图像,使场景的高频细节信息更清楚。由于两个细分波段的特点不同,各自的高频信息表现不同,因此图像增强处理应尽量提取这些信息。但彩色映射主要表现在颜色的对比增强,其亮度的细节增强有限。

小波包变换融合就是利用小波包变换将图像低、高频成分进行细分的特点,提取两幅细分图像的高频细节信息,得到更加清楚的融合图像,但是其没有颜色信息。

在 RGB 颜色空间,当修改像素点 RGB 三个值中的某一个时,该像素的颜色和亮度都会发生变化,无法对颜色信息和亮度信息单独处理。为了将彩色映射后的彩色图像的颜色和小波包变换融合后的细节丰富的亮度信息结合起来,需要将图像颜色和亮度信息进行分离, $l\alpha\beta$ 变换可以将图像从 RGB 颜色空间变换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间,达到颜色亮度分离的目的。

最后通过 $l\alpha\beta$ 逆变换将颜色增强分量 (α 、 β) 和亮度增强分量 (l') 进行合成,形成颜色和亮度增强的处理结果。

2 基本算法

2.1 彩色映射

彩色映射可以将同一场景的不同图像根据不同

的特点将其输入到彩色空间 RGB 的不同通道后再显示,从而得到彩色化的结果.这种方法简单直观,在多波段遥感图像处理中,得到广泛采用,被称为彩色编码.但是对于同样的图像选择的映射通道不同,其结果不同.对于多波段的红外图像一般主要考虑:(1)波段位置与 RGB 三种颜色的波段位置的对应,长波段对应长波段,短波段对应短波段;(2)先验的场景色调;(3)人眼的视觉敏感性;(4)表现内容的特点要求,等等.

对于中波细分图像,结合上述考虑,可以将第一个细分波段图像输入到 G 通道,第二个细分波段图像输入到 R 通道.由于人眼视觉对蓝光变化的对比灵敏度较高,Toet 等人^[8]在研究伪彩色图像融合时指出,将不同图像的差值输入 B 通道可以进一步增强各图像的特有成分,因此 B 通道的输入是两幅细分波段图像差值的绝对值.

2.2 颜色空间变换

Ruderman 等人^[9]提出了一种颜色空间表示方法,称为 $l\alpha\beta$ 颜色空间,其相应地将图像颜色从 RGB 空间转换到 $l\alpha\beta$ 空间称为 $l\alpha\beta$ 变换.由于该变换可将颜色和亮度信息分离,使颜色和亮度的处理可独立进行,因而近年来在颜色学习、颜色迁移技术中具有重要的作用.

$l\alpha\beta$ 颜色空间的 l 通道表示亮度信息,与颜色无关, α 和 β 通道表示颜色信息,分别对应黄-蓝对抗信息、红-绿对抗信息.RGB 到 $l\alpha\beta$ 变换的过程如下:

第一步将 RGB 值转换到与设备无关的 XYZ 值,然后将其转换到符合人眼视锥细胞感应光波特性的 LMS 视锥空间,综合起来变换如下

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3811 & 0.5783 & 0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (1)$$

相应的逆变换为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4679 & -3.5873 & 0.1193 \\ -1.2186 & 2.3809 & -0.1624 \\ 0.0497 & -0.2439 & 1.2045 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}. \quad (2)$$

第二步为了减少 LMS 空间数据具有较大的斜度,通常对转换后的结果取对数,然后通过解相关运算将取对数后的值变换到 $l\alpha\beta$ 空间

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log S \end{bmatrix}, \quad (3)$$

相应的逆变换为

$$\begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{3}/3 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{6}/6 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

这样,即可将一幅图像的颜色信息取出来.

2.3 基于小波包的图像融合

利用二维离散小波包变换可以实现两幅中波细分图像的融合^[3],使融合结果尽可能包含二者细节,图像更清晰.基本过程是先对细分图像进行小波包分解,然后对得到的高、低频分解系数按一定的规则融合,再对融合的系数矩阵进行重构得到融合图像.

在对图像进行小波包分解时可以采用 shannon 熵作为标准来选择小波包基.分解的层数越多,融合时选择的频率范围就越多,但分解层数越多,得到的局部空间就越小,系数数据量按指数增加,处理的计算量就越大,故不宜过多,一般取 2~5 层即可.当然,利用先验知识确定所需要处理的信息不在某一个频段,相应的频段可以不解.

(1) 低频系数的融合

若小波包分解到第 l 层,则该层的第一个节点 $(l,0)$ 属于低频分量,记为 $WP_{l,0}$,其包括了原图像的大部分信息,对融合的质量有很大的影响.这里采用式(5)进行低频分量系数的融合

$$WP_{l,0,F} = \frac{WP_{l,0,A} + WP_{l,0,B}}{2}. \quad (5)$$

(2) 高频系数的融合

小波包变换的实际作用就是对信号解相关,并将信号的大部分信息集中到一部分具有大幅值的小波系数中,因此对于高频细节系数的融合,一般选择其绝对值大的.由于图像的许多细节表现为相邻像素之间的相关性,融合时采用基于局部区域特征的融合规则.

局部区域的大小根据具体情况选择 3×3 、 5×5 、 7×7 等.特征量用下式来表示

$$E_{lk}(m,n) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w(i,j) [WP_{lk}(m-s + i, n-s+j)]^2, \quad (6)$$

式中: $E_{lk}(m,n)$ 表示第 l 层第 k 个结点系数矩阵中以点 (m,n) 为中心的局部区域能量; WP_{lk} 表示分解的第 l 层第 k 个结点系数矩阵像; $w(i,j)$ 表示权系数矩阵,一般采用高斯权系数矩阵; N 表示区域的大小; $s = (N-1)/2$. 设两幅图像 A 和 B 第 l 层第 k 个结点系数矩阵对应局部区域的能量相关度为

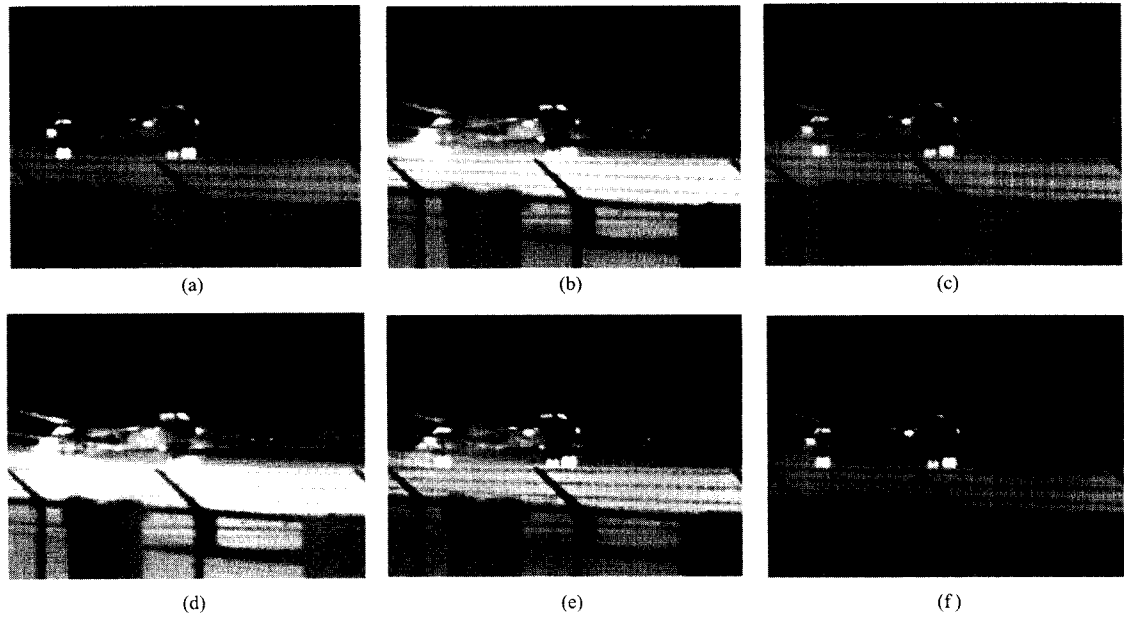


图4 飞机红外中波细分图像的颜色增强结果(a)第一细分波段图像(b)第二细分波段图像(c)彩色映射结果(d)图像c的 l 通道图像(e)小波包变换融合结果(f) $l\alpha\beta$ 逆变换的结果

Fig.4 Effects on color enhancement of subdivision band images MWIR of plane (a) image in subband 1 (b) image in subband 2 (c) result of color mapping with (a) and (b) (d) channel l of (c) (e) fusion result of wavelet packet transform (f) result of inverse $l\alpha\beta$ transform

$$M_{lk,AB}(m,n) = \frac{2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w(i,j) WP_{lk,A}(m-s+i, n-s+j) WP_{lk,B}(m-s+i, n-s+j)}{E_{lk,A}(m,n) + E_{lk,B}(m,n)} \quad (7)$$

如果存在一个阈值 T , 若 $M_{lk,AB}(m,n) < T$ 则

$$\begin{cases} WP_{lk,F}(m,n) = WP_{lk,A}(m,n), & \text{当 } E_{lk,A}(m,n) \geq E_{lk,B}(m,n) \text{ 时} \\ WP_{lk,F}(m,n) = WP_{lk,B}(m,n), & \text{当 } E_{lk,A}(m,n) < E_{lk,B}(m,n) \text{ 时} \end{cases} \quad (8)$$

若 $M_{lk,AB}(m,n) \geq T$ 则

$$\begin{cases} WP_{lk,F}(m,n) = (1-q_{lk})WP_{lk,A}(m,n) + q_{lk}WP_{lk,B}(m,n), & (E_{lk,A}(m,n) \geq E_{lk,B}(m,n)) \\ WF_{lk,F}(m,n) = q_{lk}WP_{lk,A}(m,n) + (1-q_{lk})WP_{lk,B}(m,n), & (E_{lk,A}(m,n) < E_{lk,B}(m,n)) \end{cases} \quad (9)$$

其中: $q_{lk} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1 - M_{lk,AB}(m,n)}{1 - T} \right)$, 阈值 T 是

根据实验标定的一个参数, 一般取值在 0.60 ~ 0.90. 从上可以看出, 当两幅图像对应分解层结点系数矩阵的局部区域的相关度小于阈值时, 说明在该区域二者的能量相差很大, 此时能量值大的区域的中心系数作为融合后该区域的中心系数; 反之, 二者在选定区域能量相差不大时, 采用加权平均的办法.

3 实验结果

图4(a)和图4(b)分别是飞机在机场跑道滑行的第一、第二中波细分波段图像^[6]. 第一细分波段图像主要反映温度较高部分的辐射, 起落架轮胎、高温尾焰很清楚, 但尾烟较短, 地面较暗, 前景机场围栏部分等背景较模糊; 第二细分波段图像反映了更多低温辐射的部分, 前景围栏等部分比较清楚, 地面比较亮, 尾烟较长, 但起落架轮胎轮廓不清楚. 图4(c)~图4(f)依次为彩色映射图像、彩色映射图像经 $l\alpha\beta$ 变换后的亮度通道图像、小波包变换融合图像、用图4(e)取代图4(d)后 $l\alpha\beta$ 逆变换的结果.

从主观评价的角度来观察图4可以得出以下几点: (1) 图4(c)、图4(f)具有了颜色, 其视觉效果明显增强; (2) 图4(c)~图4(f)不同程度地包含了(a)、(b)的有用信息, 如把前景围栏清楚的部分、起落架等清楚的细节的融合起来; (3) 图4(e)比图4(d)的细节信息多, 说明用图4(e)取代图4(d)的必要性更多; (4) 对于彩色图像, 图4(f)比图4(c)更

表 1 图 4 的有关衡量指标比较

Table 1 Parameters of diverse images in Fig. 4

图像及指标		局部标准偏差	局部熵
灰度图像	第一细分波段图像	7.4356	2.7972
	第二细分波段图像	9.6867	2.9757
	细分波段图像的指标均值	8.5612	2.8865
	彩色映射图像的亮度通道	8.8549	3.1120
	融合图像	9.9378	3.3023
	指标变换率 1 (%)	12.23	6.12
彩色图像	彩色映射图像	8.7937	3.0975
	$I_{\alpha\beta}$ 逆变换后的图像	9.8244	3.3318
	指标变换率 2 (%)	11.72	7.56

清楚,说明了增强的效果。

对于伪彩色增强图像,除了增加的颜色其视觉感知效果明显外,其清晰的程度仍需要客观的数据来说明^[10]。由于在观察分析图像时,人眼视觉往往采用局部对照的方法,因此这里采用图像的局部标准偏差、局部熵等作为衡量图像细节的多少、反映图像清晰程度的指标,它们的值越大,说明了图像中细节越多。但是由于灰度图像和彩色图像两类之间的比较尚未有很好的客观评价指标,局部标准偏差和局部熵无法有效反映两类图像的差别,所以其只用于同类图像的比较。表 1 中列出了图 4(a)~图 4(f)的相应衡量指标的数值。对于彩色图像(c)、(f)的衡量指标的计算采用 RGB 三个通道分别计算再平均的方法,局部的计算窗口为 9×9 。从表中可以看出:(1)融合后的图像比彩色映射图像的亮度通道的局部标准偏差和局部熵都大(见指标变化率 1,分别是 12.23% 和 6.12%),说明了利用前者取代后者的必要性;(2)最后增强的彩色图像同彩色映射的图像相比(指标变化率 2),局部标准偏差和局部熵分别提高了 11.72% 和 7.56%;(3)彩色映射图像亮度通道的指标同原来两个细分波段图像的均值相比相差不大,说明了彩色映射方法的局限性。实验数据和前面的主观分析是一致的,说明了利用本文方法不但可以为中波细分图像增加颜色,而且图像的细节更丰富,达到了图像增强的目的。

4 结语

通过前面讨论可得出:对红外中波进行波段细分成像,可以发挥各个细分波段成像的优势,对其增加伪彩色可以提高视觉观察效果,利用本文方法经

过增强颜色和亮度细节,可得到更清楚的中波细分波段的合成伪彩色图像。采用红外焦平面中波成像仪拍摄的细分图像进行实验,结果表明:使用本文方法得到的伪彩色合成图像比简单彩色映射的合成图像具有更丰富的细节信息,局部标准偏差和局部熵均提高了,达到了图像增强的目的。

REFERENCES

- [1] Tomkinson M, Teaney B, Olson J. Dual band sensor fusion for urban target acquisition [C]. *Infrared Imaging systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI*, Proceedings of SPIE, 2005, **5784**: 27—34.
- [2] XU Xiang-Yan, YE Zhen-Hua, LI Zhi-Feng, *et al.* Numerical modeling of middle wavelength two-color photovoltaic HgCdTe detectors [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (徐向晏,叶振华,李志烽,等.中波双色光伏型 HgCdTe 红外探测器模拟研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26** (3): 164—169.
- [3] YANG Feng-Bao, NI Guo-Qiang, ZHANG Lei. Dual subband MWIR images fusion based on wavelet packet transform [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (4): 275—279.
- [4] Moyer S, Driggers R G, Vollmerhausen R H, *et al.* Information deference between subbands of the mid-wave infrared spectrum [J]. *Society of photo-optical instrumentation engineers*, 2003, **42** (8): 2296—2303.
- [5] YANG Gui-Jun, LIU Qin-Huo, LIU Qiang, *et al.* Adjacency effect analysis in imaging simulation of high-resolution mid-infrared ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) remote sensing [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨贵军,柳钦火,刘强,等.高分辨率中红外遥感 ($3 \sim 5 \mu\text{m}$) 成像模拟中邻近效应分析. *红外毫米波学报*), 2008, **27** (3): 233—240.
- [6] Smith E P G, Pham L T, Venzor G M, *et al.* HgCdTe focal plane arrays for dual-color mid- and long-wavelength infrared detection [J]. *Journal of Electornic Materials*, 2004, **22** (6): 509—515.
- [7] Liu Zheng, Laganiere R. Context enhancement through infrared vision: a modified fusion scheme [J]. *SIViP*, 2007, **1**: 293—301.
- [8] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion [J]. *Optical Engineering*. 1996, **35** (3): 650—658.
- [9] Ruderman D L, Cronin T W, Chiao C C. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, **15** (8): 2036—2045.
- [10] SHI Jun-Sheng, JIN Wei-Qi, WANG Ling-Xue. Study on perceptual evaluation of fused image quality for color night vision [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (石俊生,金伟其,王岭雪.视觉评价夜视彩色融合图像质量的实验研究. *红外与毫米波学报*), 2005, **24** (3): 236—240.