

doi: 10.3788/gzxb20134201.0115

# 基于 Shearlet 变换的自适应图像融合算法

石智, 张卓, 岳彦刚

(西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

**摘 要:**针对多聚焦图像与多光谱和全色图像的成像特点,结合 Shearlet 变换具有较好的稀疏表示图像特征的性质,提出了一种新的图像融合规则.并基于此融合规则,提出了基于 Shearlet 变换的自适应图像融合算法.在多聚焦图像的融合算法中,分别对聚焦不同的图像进行 Shearlet 变换,并基于本文提出的融合规则,对分解后的高低频系数进行融合处理.通过与多种算法的比较实验证明了本文提出的算法融合的图像具有更高的清晰度和更加丰富的细节信息.在多光谱和全色图像的融合处理中,提出了一种基于 Shearlet 变换与 HSV 变换相结合的图像融合方法.该算法首先对多光谱图像作 HSV 变换,将得到的 V 分量与全色图像进行 Shearlet 分解与融合,在融合过程中对分解系数选用特定的融合准则进行融合,最后将融合生成新的分量与 H、S 分量进行 HSV 逆变换产生新的 RGB 融合图像.该算法在空间分辨率和光谱特性两方面达到了良好的平衡,融合后的图像在减少光谱失真的同时,有效增强了空间分辨率.仿真实验证明,本文算法融合的图像与传统的多光谱和全色图像融合算法相比,具有更佳的融合性能和视觉效果.

**关键词:**多聚焦图像;多光谱图像;全色图像;Shearlet 变换;HSV 变换

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2013)01-0115-6

## Adaptive Image Fusion Algorithm Based on Shearlet Transform

SHI Zhi, ZHANG Zhuo, YUE Yan-gang

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** For the imaging characteristics of multi-focus images, multi-spectral images and panchromatic images, since the Shearlet transform has better properties to sparse express the characteristics of the images, a kind of new image fusion rules is proposed. Moreover, based on the fusion rules, the algorithm of adaptive fusion rules based on Shearlet transform is proposed. In the algorithm of multi-focus images fusion, the different focus images are transformed with Shearlet transform respectively, and the decomposed low-frequency coefficients and high-frequency coefficients were fused according to the proposed fusion rules. It is verified that the proposed algorithm has better clarity and richer details information compared with many algorithms. Multi-spectral and panchromatic images fusion algorithm is proposed based on combination of Shearlet and HSV transform. Firstly, the multi image is transformed with HSV transform; then, the gotten V component is Shearlet transformed with pan image and the specific fusion rules is chosen for the decomposition coefficient in the fusion process; finally, the new V and H, S components are transformed with inverse HSV transform. This algorithm reached a good balance in the two aspects of spatial resolution and spectral characteristics. The fused images can reduce spectral distortion, and effectively enhance the spatial resolution. The simulation experiments show that the proposed algorithm has better fusion performance and

基金项目:陕西省自然科学基金(No. 2009JM1002)和陕西省教育厅专项科研基金(Nos. 09JK539, 11JK0468)资助

第一作者:石智(1956—),男,教授,博士,主要研究方向为小波分析与图像处理. Email:shizhi8201@sina.com

通讯作者:张卓(1986—),女,硕士研究生,主要研究方向为小波分析与图像处理. Email:zhangzhuokaoyan@126.com

收稿日期:2012-07-13;录用日期:2012-10-08

visual effect, compared to traditional multi-spectral and panchromatic images fusion algorithms.

**Key words:** Multi-focus image; Multi-spectral images; Panchromatic images; Shearlet transform; HSV transform

## 0 引言

图像融合以图像作为研究和处理对象,它把对同一目标或场景用不同传感器所获得的图像,或同一传感器以不同方式获得的多重图像根据需要通过融合规则合成为一幅图像,在这一幅图像中能反映多重原始图像中的信息,以达到对目标和场景的综合描述.目前,图像融合的方法很多,20世纪80年代以后,各国学者纷纷提出了各种各样的融合系统形式<sup>[1]</sup>,在空间域图像融合中,如主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA),加权平均法, HIS 变换等.另外基于变换域的图像融合目前在图像融合领域中发挥相当重要的作用,1983年 Burt P. J. 首次提出了基于拉普拉斯金字塔变换算法<sup>[2]</sup>.1995年 Chipman 及 Li 分别提出采用离散小波变换对图像进行融合处理,90年代中期 Sweldens 等学者提出一种不依赖于傅立叶变换的小波构造方法<sup>[3]</sup>.尽管小波变换能够将图像进行多尺度多方向分解,但是分解的方向数仅仅只有水平、垂直和对角三个方向,为了克服小波方向数的限制,发展了一种新的高维函数的最优表示方法—多尺度几何分析法<sup>[4]</sup>,它的理论框架最初是由曾经推动小波分析发展的一批先驱者 Daubechies 等学者构建的.2002年, Minh N. Do 和 Martin Vetterli 提出了 Contourlet 变换,2004年 Vladan Velisavljevic 等人提出了 Directionlet 变换,2005年, D. Labate 等人又提出了的 Shearlet 变换,这些新方法都具有优于小波变换的特性,能够更好地进行图像奇异性的检测. Shearlet 变换继承了小波变换的优良性质,不仅具有多尺度、良好的时频局部特性,还具有多方向特性,允许每个尺度上具有不同数目的方向分解,其紧支撑区间具有随尺度而长宽比变化的“各向异性”特性,能够实现对图像的稀疏表示.将 Shearlet 变换引入到图像融合中,并针对各类图像的特点选择合适的融合规则,成为近年来研究的热点.本文结合 Shearlet 变换,提出了一种自适应图像融合算法,并与传统多光谱和全色图像算法进行了比较.

## 1 Shearlet 变换

Shearlet 变换<sup>[5-8]</sup>是一个新的多尺度几何分析工具,它克服了 Wavelet 变换不能较好地捕捉多维数据几何特性的缺点,能够对二维图像进行最优的逼近.可以通过膨胀的仿射系统把几何和多尺度分

析结合起来构造剪切波(Shearlet).当维数  $n=2$  时,具有合成膨胀的仿射系统形式为

$$\mathbf{A}_{AB}(\psi) = \{\psi_{j,l,k}(x) = |\det A|^{j/2} \psi(B^l A^j x - k); j, l \in \mathbf{Z}, k \in \mathbf{Z}^2\}$$

式中  $\psi \in L^2(\mathbf{R}^2)$ ,  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  是可逆矩阵,并且  $|\det B| = 1$ .如果满足 Parseval 框架(紧框架条件)

$$\sum_{j,l,k} |\langle f, \psi_{j,l,k} \rangle|^2 = \|f\|^2$$

$\mathbf{A}_{AB}(\psi)$  被称为合成小波,其中  $f \in L^2(\mathbf{R}^2)$ .

在合成仿射系统的中,对角矩阵  $A^j$  和一个尺度变换相关联,矩阵  $B^l$  和一个几何变换相关联,如旋转,剪切.

$$\text{当 } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ 时,就是剪切波.}$$

矩阵  $\mathbf{A}$  控制了 Shearlet 变换的尺度,矩阵  $\mathbf{B}$  控制了 Shearlet 变换的方向.

对任意  $\xi = (\xi_1, \xi_2) \in \hat{\mathbf{R}}^2, \xi_1 \neq 0$ , 设  $\psi^{(0)}$  为

$$\hat{\psi}^{(0)}(\xi) = \hat{\psi}^{(0)}(\xi_1, \xi_2) = \hat{\psi}_1(\xi_1) \hat{\psi}_2(\xi_2/\xi_1)$$

式中  $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2 \in C^\infty(\hat{\mathbf{R}})$ ,  $\text{supp } \hat{\psi}_1 \subset [-1/2, -1/16] \cup [1/16, 1/2]$ , 并且  $\text{supp } \hat{\psi}_2 \subset [-1, 1]$ . 能够得到  $\hat{\psi}^{(0)} \in C^\infty(\hat{\mathbf{R}})$ , 并且  $\text{supp } \hat{\psi}^{(0)} \subset [-1/2, 1/2]^2$ .

假设

$$\sum_{j \geq 0} |\hat{\psi}_1(2^{-2j}\omega)|^2 = 1, |\omega| \geq 1/8 \quad (1)$$

并且,对  $\forall j \geq 0$

$$\sum_{l=-2^j}^{2^j-1} |\hat{\psi}_2(2^j\omega - l)|^2 = 1, |\omega| \leq 1 \quad (2)$$

根据  $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2$  的支集就能够得到函数  $\psi_{j,l,k}$  的频域支集为

$$\text{supp } \hat{\psi}_{j,k,l}^{(0)} \subset \{(\xi_1, \xi_2) : \xi_1 \in [-2^{2j-1}, -2^{2j-4}] \cup [2^{2j-4}, 2^{2j-1}], |\xi_2/\xi_1 + l2^{-j}| \leq 2^{-j}\}$$

也就是说,  $\hat{\psi}_{j,k,l}$  是一个大小为  $2^{2j} \times 2^j$  的梯形对,方向沿着  $2^{-j}l$ .

对于满足上面性质的  $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2$  的选择有许多种.综合式(1)和(2),也就是说对

$$\forall (\xi_1, \xi_2) \in D_0, \sum_{j \geq 0} \sum_{l=-2^j}^{2^j-1} |\hat{\psi}^{(0)}(\xi A_0^{-j} B_0^{-l})|^2 =$$

$$\sum_{j \geq 0} \sum_{l=-2^j}^{2^j-1} |\hat{\psi}_1(2^{-2j}\xi_1)|^2 |\hat{\psi}_2(2^j\xi_2/\xi_1 - l)|^2 = 1$$

其中  $D_0 = \{(\xi_1, \xi_2) \in \hat{\mathbf{R}}^2 : |\xi_1| \geq 1/8, |\xi_2| \leq 1\}$  即

$$\{\hat{\psi}^{(0)}(\xi A_0^{-j} B_0^{-l})\}$$
 形成了  $D_0$  上的一个紧支集.

这个性质,结合 $\hat{\psi}^{(0)}$ 的支集在 $[-1/2, 1/2]^2$ ,得到集合

$$\{\psi_{j,l,k}^{(0)}(x) = 2^{\frac{3j}{2}} \psi^{(0)}(B_0^l A_0^j x - k) : j \geq 0, -2^j \leq l \leq 2^j - 1, k \in \mathbb{Z}^2\}$$

是 $L^2(D_0)^\vee = \{f \in L^2(\mathbb{R}^2) : \text{supp } \hat{f} \subset D_0\}$ 上的一个 Parseval 框架。

## 2 融合规则的选取

在图像融合过程中,融合规则的选取是影响图像融合质量的一个重要因素.对于传统的融合规则,如加权平均法,绝对值和取大法等单一的融合规则容易丢失图像的很多信息.本文根据几类图像的特点,提出了一种自适应的低频系数融合准则,实验表明此方法具有针对性和实践性.

对于 Shearlet 变换以后得到的低频分量,采用

$$F(i, j) = [(A(i, j) + \chi B(i, j)) - |A(i, j) - \chi B(i, j)|]^\alpha$$

式中 $\alpha, \chi$ 为参量,式子的前半部分 $(A(i, j) + \chi B(i, j))^\alpha$ 表示取两幅图像的加权均值,影响融合后图像的能量,对融合后图像的亮度起决定作用;而后半部分 $|A(i, j) - \chi B(i, j)|^\alpha$ 表示取两幅图像的加权差值,包含两幅图像的模糊因子.因子 $\chi$ 调节两幅图像的占优比例,使两幅亮度不同的图像达到均衡;随着因子 $\alpha$ 的增大,图像加亮,边缘加强,为了准确起见,将 $\alpha$ 和 $\chi$ 根据图像的特点确定下来.本文采用平均梯度和空间频率计算两个参量.

如果 $AG(a) \geq AG(b)$ 时,

$$\alpha = AG(a) / (AG(a) + AG(b)), \text{ 否则}$$

$$\alpha = AG(b) / (AG(a) + AG(b)).$$

如果 $SF(a) \geq SF(b)$ 时,

$$\chi = SF(b) / SF(a) + 1, \text{ 否则}$$

$$\chi = SF(a) / SF(b) + 1.$$

其中 $AG(a), AG(b)$ 分别为两幅图像的平均梯度, $SF(a), SF(b)$ 分别为两幅图像的空间频率.

对于高频系数选择区域方差的融合规则,选择区域方差值较大的像素值作为融合图像的像素值.

区域方差的计算方法为

$$D_x(i, j) = \frac{\sum_{i \leq M, j \leq N} (Y_x(i, j) - \bar{Y}_x)^2}{M \times N}, X = A, B$$

式中 $Y_x(i, j)$ 是 $(i, j)$ 点处的像素值; $M, N$ 是邻域大小,本文选择邻域大小为 $3 \times 3$ ;A、B则是两幅源图像; $\bar{Y}$ 是图像 $X$ 在邻域内的均值.

通过式子

$$F(i, j) = \begin{cases} a(i, j), & D_a(i, j) \geq D_b(i, j) \\ b(i, j), & D_b(i, j) > D_a(i, j) \end{cases}$$

可得到融合图像的高频系数,式中 $D_a(i, j), D_b(i, j)$ 分别为两幅图像高频部分的局部方差矩阵.

## 3 多聚焦图像融合算法

多聚焦图像聚焦部分具有大量的细节信息,所以对于多聚焦图像融合,最重要的就是准确的提取图像的细节特征.所以针对多聚焦图像,结合其成像特点,将 Shearlet 变换引入多聚焦图像融合中,并结合本文提出了自适应融合规则.本算法采用标准差(Standard Deviation, STD)、信息熵(Information Entropy, IE)、平均梯度(Average Gradient, AG)和空间频率(Spatial Frequency, SF)对融合图像进行了客观指标的评价.

### 3.1 融合步骤

首先对左聚焦图像和右聚焦图像分别进行 Shearlet 正变换,得到各自的低频分量和高频分量,然后对得到的低频分量和高频分量分别采用自适应融合规则和区域方差的融合规则进行融合,得到新的子图像,最后在对其进行 Shearlet 逆变换得到融合图像.算法流程图如图 1.

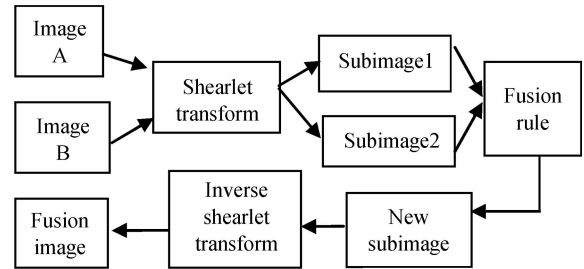


图 1 多聚焦图像的融合流程

Fig. 1 Fusion flowchart of the multi-focus image

### 3.2 实验结果分析

对于多聚焦图像的融合算法很多,如加权平均的融合算法、传统小波的融合算法和 Contourlet 变换的融合算法等,这些算法得到的融合图像容易产生振铃效应或者是细节信息丢失严重,实用性不大.为了验证本文提出算法的有效性,将多聚焦图像“闹钟”作为实验对象,并将本文算法和传统小波算法以及 Contourlet 算法作了比较,并通过客观检验标准进行了检验.

图 2 是闹钟多聚焦图像融合实验,图 2(a)是右聚焦图像,图像较好地表现出了右半边信息,图 2(b)是左聚焦图像,图像较好地表现出了左半边信息,图 2(c)是基于 db2 的多聚焦图像融合算法得到的融合图像,该融合图像细节信息丢失较为严重,不能较好地辨认源图像聚焦部分的信息,图 2(d)是基于 Contourlet 变换的图像融合算法,所得到的融合图像信息产生振铃效应,图像 2(e)是基于 Shearlet

变换与自适应融合规则相结合得到的融合图像,该融合图像细节部分保存很好,能够更好地表征图像的信息.从表1中可以看出,本文提出的算法在标准差、熵、平均梯度、空间频率的指标上都优于小波变换和 Contourlet 变换的融合算法.总之,不管从主观方面还是客观方面都充分表明本文算法的有效性和优越性.

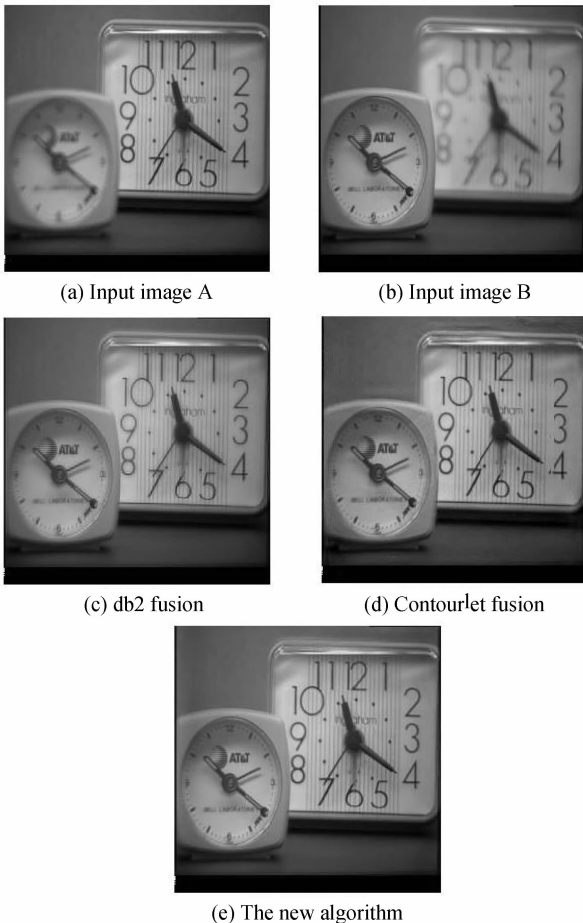


图2 多聚焦图像的融合实验

Fig. 2 Fusion experiment of the multi-focus image

表1 融合图像实验标准

Table 1 Test standards of image fusion

Algorithm	STD	IE	AG	SF
db2	50.8285	7.3642	6.5543	15.5082
Contourlet	51.6831	7.4237	7.2825	17.5102
Shearlet	52.5489	7.4328	7.2973	17.8828

## 4 多光谱图像和全色图像融合算法

高分辨率全色图像较好地反映了空间结构信息,能够精确描述地物的细节特征,但其光谱分辨率较低;而低分辨率多光谱图像则有丰富的光谱信息,有利于对地物的识别与解释,但其空间分辨率较低.因此,将多光谱图像与高分辨率全色图像进行融合,

使融合后的多光谱图像既具有较高的空间细节表现能力,同时保留多光谱图像的光谱特性,以获得对地物更全面的描述.将 Shearlet 变换与 HSV 变换引入遥感图像融合<sup>[9]</sup>中,并结合本文提出了自适应融合规则.根据客观检验标准,表明该算法是有效的和正确的.

### 4.1 HSV 与 RGB 色彩空间的转换

HSV 色彩空间中<sup>[10]</sup>, $H$  参量表示色彩信息,即所处的光谱颜色的位置.该参量用一角度量来表示,红、绿、蓝分别相隔  $120^\circ$ .互补色分别相差  $180^\circ$ ;纯度  $S$  为一比例值,范围从 0 到 1,它表示成所选颜色的纯度和该颜色最大的纯度值之间的比率. $S=0$  时,只有灰度; $V$  表示色彩的明亮程度,范围从 0 到 1.

设  $p = \max(R, G, B)$ ,  $q = \min(R, G, B)$ , 则 RGB 到 HSV 的变换表达式为

$$V = p, s = \begin{cases} (p-q)/p, & p \neq 0 \\ 0, & p = 0 \end{cases}$$

$$H = \begin{cases} 0, & S = 0 \\ 60(G-B)/(p-q), & R = p \& G \geq B \\ 360 + 60(G-B)/(p-q), & R = p \& G < B \\ 120 + 60(G-B)/(p-q), & G = p \\ 240 + 60(R-B)/(p-q), & B = p \end{cases}$$

若  $H = 360$ , 则  $H = 0$ , 设  $k = \lfloor H/60 \rfloor$ ,  $m = H/60 - k$ , 其中:  $k$  为  $H$  被 60 整除的除数,  $m$  是被 60 整除的余数.

$$\alpha = V(1-S), \beta = V(1-Sm)$$

$$\chi = V(1-S(1-m))$$

则 HSV 转换到 RGB 的数学表达式为

$$\begin{cases} R = V, G = \chi, B = \alpha, (k=0) \\ R = \beta, G = V, B = \alpha, (k=1) \\ R = \alpha, G = V, B = \chi, (k=2) \\ R = \alpha, G = \beta, B = V, (k=3) \\ R = \chi, G = \alpha, B = V, (k=4) \\ R = V, G = \alpha, B = \beta, (k=5) \end{cases}$$

### 4.2 算法步骤

首先将多光谱图像根据 HSV 正变换将 RGB 空间转换为 HSV 色彩空间,变换后,光谱信息仍集中保留在  $H$  和  $S$  分量中,所以只将  $V$  分量与全色图像进行 Shearlet 分解,对其分解后得到的高频系数和低频系数选择上述的融合规则进行融合,得到新的子图像,在对其进行 Shearlet 反变换得到新的分量  $V'$ ,最后将生成的  $V'$  与  $H$ 、 $S$  分量进行 HSV 逆变换产生新的 RGB 融合图像.算法流程如图 3.

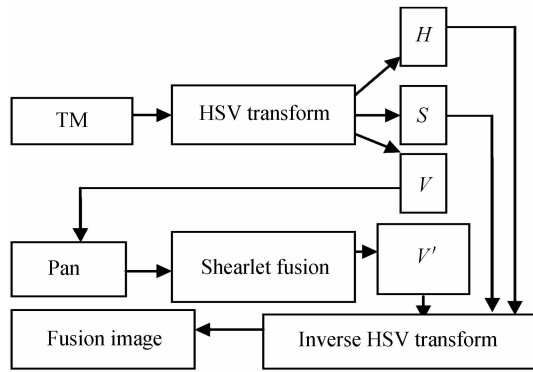


图 3 TM 图像与 Pan 图像的融合流程

Fig. 3 Fusion flowchart of the TM image and Pan image

### 4.3 实验结果分析

对于多光谱与全色图像的融合方法很多,具有代表性的方法如主成分分析法的融合,虽然在分辨率上比较好,但有较大的谱失真,并相关度也较弱,小波加权的融合算法虽然相关度较高,但是它的清晰度偏低,光谱信息也有一定的损失,类似的方法还有 HIS 和 Contourlet 变换与 LHS 变换相结合的融合算法等.综合考虑,它们的融合结果都没有本文提出的算法有优势.本文将基于 Shearlet 与 HSV 变换相结合的图像融合方法引入到多光谱图像和全色图像融合中,并采用自适应融合规则,以克服它们自身的缺陷.将本文算法与 HSV 和 Wavelet+HSV 变换、Contourlet+HSV 的融合效果通过客观检验标准<sup>[11-12]</sup>进行对比,主要用相关系数 (Correlation Coefficient, CC)、标准差 (Standard Deviation, STD)、平均梯度 (Average Gradient, AG)、均值 (Mean Value, MV) 进行评价,验证本文算法的正确性和优越性.

图 4(a)和(b)分别为源全色图像和多光谱图像,图 4(c)为基于 HSV 变换的图像融合,图 4(d)为基于 Wavelet 与 HSV 变换相结合的图像融合,图 4(e)为基于 Contourlet 与 HSV 变换结合的图像融合,图 4(f)为基于 Shearlet 与 HSV 变换相结合的图像融合.从主观方面上看,图 4 中(c)虽然分辨率比较理想,但是光谱信息有一定的损失,图 4 中(d)虽然获得光谱信息比较好,但是从全色图像中得到的空间信息较少,并且视觉上比较模糊,图 4(e)虽然空间分辨率较好,但是由于 Contourlet 所采用的方向滤波器的方向数受限制,所以细节信息不是很好,而图 4(f)的色彩更接近多光谱图像,它的纹理信息及边缘效果也较好,既保持了低分辨率图像中更多的光谱信息,同时也具有高分辨率图像中的高频信息,具备一定目标识别和光谱分析领域的应用价值.从客观方面上看,根据图像的标准差、相关系数、平均梯度、均值这 4 个评价标准,我们对图 4 中

的四种方法的融合结果进行仿真实验,得到表 2 中所列出的一系列数据,从表中的数据的大小可以看出 Shearlet+HSV 融合图像的评价指标基本上优于 Contourlet+HSV、Wavelet+HSV 和 HSV 变换的融合图像,这说明本文提出的算法在一定程度上具有有效性和优越性.

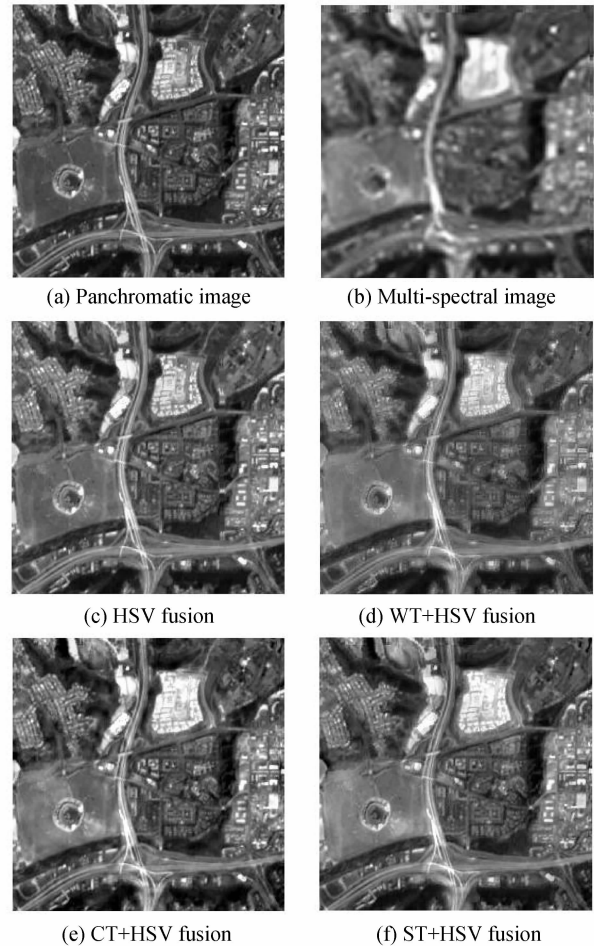


图 4 TM 图像与 Pan 图像的融合实验

Fig. 4 Fusion experiment of the TM image and Pan image

表 2 融合图像实验标准

Table 2 Test standards of image fusion

Algorithm	Band	MV	STD	CC	AG
HSV	R	108.5977	49.4329	0.7263	14.0500
	G	98.7920	47.5084	0.7552	13.0129
	B	78.5703	48.2590	0.8453	11.0461
WT+HSV	R	108.6019	46.6889	0.9132	11.4986
	G	98.9012	45.5700	0.9237	10.7393
	B	79.2074	47.3889	0.9521	9.4976
CT+HSV	R	108.2346	55.6206	0.8301	14.0340
	G	98.7820	53.6638	0.8456	12.2029
	B	79.6049	52.8005	0.8996	10.6728
ST+HSV	R	109.4592	51.4475	0.8921	13.3547
	G	99.8114	50.0714	0.9042	12.4666
	B	80.2971	50.6507	0.9370	10.7706

## 5 算法运行时间比较

对于多聚焦图像的融合和遥感图像的融合,根

据实验结果分析,本文提出算法的图像融合质量具有优势,而对于本文算法时间的开销方面如何,根据以下表格进行比较.

表3是多聚焦图像融合运行时时间比较,表4是多光谱与全色图像融合的运行时间比较.从表中可以看出,虽然HSV和Wavelet的运行时间短,但是融合的效果并不能满足实际的应用. Shearlet和Contourlet都属于第三代小波,第三代小波都具有比Wavelet更高的时间复杂度,但是融合的效果均优于Wavelet.相对于研究更多的Contourlet变换,Shearlet变换不仅在融合的效果上优于Contourlet,而且由于采用了更加快速的Shear滤波器的生成算法,所以在运行时间上也比Contourlet变换更具有优势.

表3 多聚焦图像的运行时间比较

Table 3 Runtime comparison of the multi-focus image

Algorithm	Runtime/s
db2	1.046000
Contourlet	2.803000
Shearlet	2.750000

表4 多光谱图像和全色图像的运行时间比较

Table 4 Runtime comparison of the TM image and pan image

Algorithm	Runtime/s
HSV	0.703000
Wavelet+HSV	1.766000
Contourlet+HSV	3.720000
Shearlet+HSV	3.653000

## 6 结论

本文提出了一种自适应低频系数融合规则,并将Shearlet变换与此融合规则相结合引入到多聚焦图像和遥感图像融合中,大大简化了图像融合过程中的运算量.在对多聚焦图像融合中,将本文算法与小波变换的图像融合算法<sup>[13-14]</sup>、Contourlet算法进行对比,仿真实验表明,本文算法可供计算机进行目标识别和图像理解.在遥感图像融合过程中,将Shearlet与HSV变换相结合对其进行融合,并将本文的图像融合方法与HSV和Wavelet+HSV变换、Contourlet+HSV的图像融合算法进行实验和分析,得出本文算法不论在视觉上还是客观检验方面优于其他两种算法,它更加适合于以光谱分析为主的领域,如它可以为测量和专业制图提供有力的数据,而且可以用于地物分类、目标识别等一系列处理,有利于专家视觉和自动图像解译.

## 参考文献

- [1] WANG Hong, JING Zhong-liang, LI Jian-xun. Research and development of multiresolution image fusion [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, **21**(4): 145-151.  
王宏, 敬忠良, 李建勋. 多分辨率图像融合的研究与发展[J]. *控制理论与应用*, 2004, **21**(4): 145-151.
- [2] LUI Z, TSUKADA K, HANASAKI K, *et al.* Image fusion by using steerable pyramid[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2001, **22**(9): 929-939.
- [3] WANG Ke, OU Yang-ning. Application of wavelet analysis in multi-image fusion[J]. *Electronics Optics Control*, 2008, **15**(3): 64-67.  
王珂, 欧阳宁. 小波分析在多聚焦图像融合中的应用[J]. *电光与控制*, 2008, **15**(3): 64-67.
- [4] 焦李成, 侯彪, 王爽, 等. 图像多尺度几何分析理论与应用—后小波分析理论与应用[M]. 西安:西安电子科技大学, 2008.
- [5] CHAI Yong, HE You, QU Chang-wen. Remote sensing image fusion based on iterative discrete shearlet transform[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, **47**(3): 174-176.  
柴勇, 何友, 曲长文. 迭代离散Shearlet变换异类源遥感图像融合[J]. *计算机工程与应用*, 2011, **47**(3): 174-176.
- [6] MIAO Qi-guang, SHI Cheng, XU Peng-fei, *et al.* A novel algorithm of image fusion using shearlets [J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(6): 1540-1547.
- [7] MIAO Qi-guang, SHI Cheng, XU Peng-fei, *et al.* Multi-focus image fusion algorithm based on shearlets[J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, **9**(4): 041001-1~5.
- [8] GUO K, LABATE D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlet [J]. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 2007, **39**(1): 298-318.
- [9] LU Ya-ning, GUO Lei, LI Hui-hui. Remote sensing image fusion using edge information and features of SAR image based on curvelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1118-1123.  
路雅宁, 郭雷, 李晖晖. 结合边缘信息和图像特征信息的曲波域遥感图像融合[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1118-1123.
- [10] CHANG Hua-wen, CHEN Chun-xiang. Image fusion based on HSV color space model and wavelet transform[J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, **28**(23): 5682-5684.  
常华文, 陈春香. 基于HSV变换与小波变换的遥感图像融合[J]. *计算机工程与设计*, 2007, **28**(23): 5682-5684.
- [11] DI Hong-Wei, LIU Xian feng. Image fusion quality assessment based on structural similarity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 766-771.  
狄红卫, 刘显峰. 基于结构相似度的图像融合质量评价[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5): 766-771.
- [12] GAO Shao-shu, JIN Wei-qi, WANG Ling-xue, *et al.* Objection quality assessment of image fusion[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, **32**(4): 672-677.  
高绍姝, 金伟其, 王岭雪, 等. 图像融合质量客观评价方法[J]. *应用光学*, 2011, **32**(4): 672-677.
- [13] NA Yan, SHI Lin, YANG Wan-hai. Remote sensing image fusion with wavelet packet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 736-738.  
那彦, 史林, 杨万海. 小波包变换与遥感图像融合[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 736-738.
- [14] YAN Wen-hao, MA Cai-wen, ZHANG Ming, *et al.* A new way for image fusion based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 638-640.  
燕文浩, 马彩文, 张鸣, 等. 基于小波变换的图像融合新算法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 638-640.