

# 一种基于 Choquet 模糊积分小波系数选择的遥感图像融合方法

凌 静,徐立中,石爱业,黄凤辰,汤 敏

河海大学 计算机及信息工程学院,江苏 南京 210098

**摘 要:** 为较好地保留多光谱、高分辨率遥感影像融合时的光谱信息和高分辨率信息,在小波变换基础上提出了一种基于模糊积分的融合算法,其基本思想是在 IHS 空间,对强度分量  $I$  及高分辨率图像进行小波分解后,保留  $I$  分量的低频系数,对于高频细节特征,将局部窗口内的方差、平均梯度和能量当作单因素指标,应用 Choquet 模糊积分综合各单因素指标得到一个综合指标,并据此来选取小波系数。实验结果表明,该算法在光谱质量改善方面明显优于 IHS 以及一些经典的小波变换遥感图像融合算法,是一种有效的遥感图像融合算法。

**关键词:** 遥感图像融合,小波变换,模糊积分,IHS 变换

**中图分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A

## 1 引言

目前遥感图像的信息融合方法主要有主成分(PCA)变换、IHS 变换等方法,上述方法因其本身的局限性,均存在图像光谱信息的部分丢失问题。近年来小波变换在遥感图像融合中得到越来越多的关注,基于小波变换融合规则的选择是关键的一步,直接影响融合图像的质量,基于区域融合的方法成为研究的重点。一些基本的区域图像融合方法包括区域方差选择,能量选择,梯度选择(Yocky, 1995; Li *et al.*, 1995)等。这些方法虽然考虑到像素间的联系,但选择对应的小波系数时只考虑到单个指标,有一定的局限性。依据 Choquet 模糊积分的非线性加权平均性以及将多源信息组合在一起的能力,提出了一种基于 Choquet 模糊积分小波系数选择的遥感图像融合方法,该算法将局部窗口内的方差、平均梯度和能量当作单因素指标,应用 Choquet 模糊积分综合各单因素指标得到一个综合指标,据此来选取小波系数。一种新算法(石爱业 & 徐立中, 2007)也是应用 Choquet 模糊积分进行融合的方法,但其基本思想是构造新的小波系数,改变了图像的原始信息。本文方法既可保留小波系数的原始信息,还可将高频局部窗口内的方差、平均梯度及能量有效地结合起来进行小波系数选择,这样不仅考虑了这 3 个单因素指标的客观信息,同时考虑了三者的重要程度。此外,该方法还可以方便地扩展单因素指标集。

实验结果证明了该方法的有效性。

## 2 Choquet 积分的预备知识

定义 1(杨伦标 & 高英仪, 1995): 设  $U$  为论域,  $P(U)$  表示  $U$  的幂集, 如果映射  $g: P(U) \rightarrow [0, 1]$  满足

- (1)  $g(\emptyset) = 0, g(U) = 1$ ;
- (2)  $A, B \in P(U)$ , 且  $A \subseteq B \Rightarrow g(A) \leq g(B)$ ;
- (3)  $A_n \uparrow A \Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} g(A_n) = g(A)$

则称  $g$  为  $F$  测度,  $(U, P(U), g)$  为  $F$  测度空间。如果  $F$  测度还满足下面的条件, 则称为  $\lambda$ - $F$  测度。

$g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B)$ , 如果  $\lambda \in (-1, \infty)$ , 且  $A \cap B = \emptyset$ 。

定义 2 (Murofushi & Sueno, 1989): 设  $(S, P(S), g)$  为  $F$  测度空间,  $h \in h(S)$ ,  $h(S)$  表示  $S$  上所有非负可测函数的集合,  $A \in P(S)$ ; 则  $h$  在  $A$  上关于  $g$  的 Choquet 积分为

$$(c) \int_A h dg = \int_0^{+\infty} g(h_\partial \cap A) d\partial \quad (1)$$

这里“(c)  $\int$ ”表示 Choquet 积分,

$$h_\partial = \{s/h(s) \geq \partial\}, \partial \in [0, 1]。$$

当论域  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  为有限集合, 且  $h(s_1) \leq h(s_2) \leq \dots \leq h(s_n)$ , 由(1)式可得  $h$  在  $S$  上关于  $g$  的 Choquet 积分

收稿日期: 2007-09-26; 修订日期: 2007-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 60774092); 教育部科学技术研究重点项目(编号: 107057)和教育部博士点基金(编号: 20070294027)。

第一作者简介: 凌 静(1984—), 女, 河海大学信号与信息处理专业硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。E-mail: hhu.lingjing@163.com。

$$(c) \int_S h d g = \sum_{i=1}^n g(h_{\theta_i})(h(s_i) - h(s_{i-1})) \quad (2)$$

其中,  $h_{\theta_i} = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_n\}, h(s_0) = 0$ 。

### 3 基于 Choquet 模糊积分的遥感图像融合

#### 3.1 基于 Choquet 积分的遥感图像融合的具体步骤

基于 Choquet 积分的遥感图像融合的具体步骤为:

(1) 将高分辨率全色影像 PAN 配准到低分辨率多光谱图像 MS 上;

(2) 对多光谱图像 MS 进行 IHS 变换, 分别得到在 IHS 色彩空间的色度  $H$ 、饱和度  $S$  和强度分量  $I$ , 然后对  $I$  分量进行 3 层小波分解;

(3) 将 PAN 与 MS 的  $I$  分量进行直方图匹配, 得到  $PAN_1$ , 然后进行小波分解, 分解层数为 3 层;

(4) 按照 Choquet 积分融合规则对各个分解层的图像进行融合, 小波逆变换重构得到强度分量  $I'$ ;

(5) 将  $I', H, S$  进行 IHS 逆变换, 得到融合后的图像  $F$ 。

#### 3.2 融合规则及融合算子

强度分量  $I$  和直方图匹配后的高分辨率影像  $PAN_1$  经小波分解后的融合规则如下:

(1) 对分解后图像的低频部分(位于最高分解层)取 MS 图像  $I$  分量的小波分解系数, 以尽可能地保持光谱特性, 减少色彩畸变。

(2) 对于高频分量, 采用基于模糊积分选择的算子, 融合算子的确定方法如下:

① 确定一个  $3 \times 3$  的窗口, 记为  $Q$ 。

② 记待融合的  $I$  分量和  $PAN_1$  图像为  $I_A, I_B$ ; 其经小波分解后的小波系数为  $W(I_A, p), W(I_B, p)$ ; 其中  $p$  代表像素的位置。

③ 确定单因素指标。在局部窗口中, 方差是一个对比度的测度, 它反映图像细节的信息量; 平均梯度反映了图像的清晰程度以及纹理变换程度; 局部能量反映出信号变化的绝对强度, 而信号变化强度大的点正反映了图像的显著特征, 这三者分别反映了局部窗口所包含的信息量、清晰程度和信号变化强度等不同方面的特征指标, 因此, 综合这几种指标可以使小波系数的选择更加准确。

从式(2)可以看出, 在实际应用中, 可以根据图像融合需要的不同, 选择不同单因素指标集, 即可以方便地拓展或者缩小论域  $S$  的大小。

④ 分别求出  $I_A, I_B$  图像以  $p$  为中心像元的局部窗口内的方差, 记为  $D(I_A, p), D(I_B, p)$ 。

⑤ 分别计算  $I_A, I_B$  中每个像素的局部平均梯度; 其定义如下:  $g = \frac{1}{n} \sum \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)/2}$ , 式中,  $\Delta I_x$  与  $\Delta I_y$  分别为  $x$  与  $y$  方向上的差分,  $n$  为矩阵的大小, 记为  $G(I_A, p), G(I_B, p)$ 。

⑥ 分别计算  $I_A, I_B$  图像局部区域  $Q$  的能量;  $E(I_A, p) = \sum_{q \in Q} w(q) C_J^2(I_A, q)$ , 式中  $C_J(I_A, q)$  表示图像  $I_A$  在  $q$  点的小波系数,  $w(q)$  表示权值, 且有:

$$\sum_{q \in Q} w(q) = 1, Q \text{ 为 } p \text{ 点的一个邻域, 本文取权值 } w(q) = \frac{1}{9}, \text{ 同样可得 } E(I_B, p)。$$

⑦ 信度函数的确定。选择局部窗口内方差、平均梯度和能量构成单因素指标集, 对图像  $I_A$ , 令

$$\begin{aligned} A_{\max} &= \max\{D(I_A, p), G(I_A, p), E(I_A, p)\} \\ A_{\text{mid}} &= \text{mid}\{D(I_A, p), G(I_A, p), E(I_A, p)\} \\ A_{\min} &= \min\{D(I_A, p), G(I_A, p), E(I_A, p)\}, \end{aligned}$$

分别代表三者的最大值、中值以及最小值。

构造信度函数  $h(u)$  如下(徐宝昌 & 陈哲, 2004):

$$\begin{aligned} h(u_1) &= \frac{D(I_A, p) - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}, \\ h(u_2) &= \frac{G(I_A, p) - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}, \\ h(u_3) &= \frac{E(I_A, p) - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \end{aligned} \quad (3)$$

依据模糊积分的单调性约束条件:  $0 \leq h(u_1) \leq h(u_2) \leq \dots \leq h(u_m) \leq 1$ , 将上式重新排列, 即

$$\begin{aligned} h(u_1) &= \frac{A_{\min} - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} = 0, \\ h(u_2) &= \frac{A_{\text{mid}} - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}, \\ h(u_3) &= \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

同样, 对图像  $I_B$ , 令

$$\begin{aligned} B_{\max} &= \max\{D(I_B, p), G(I_B, p), E(I_B, p)\}, \\ B_{\text{mid}} &= \text{mid}\{D(I_B, p), G(I_B, p), E(I_B, p)\}, \\ B_{\min} &= \min\{D(I_B, p), G(I_B, p), E(I_B, p)\} \end{aligned}$$

可得信度函数如下:

$$\begin{aligned} h(s_1) &= \frac{B_{\min} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} = 0, \\ h(s_2) &= \frac{B_{\text{mid}} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}, \\ h(s_3) &= \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

⑧ 模糊测度值的确定。应用 Choquet 积分进行融合时,另一个关键问题是确定  $P(U)$  上的  $F$  测度  $g$ ,这里用对各单因素指标的重视程度来表征模糊测度,由于信度函数从小到大排列,因此对较大的信度函数给予较大的重视程度,具体定义如下:对图像  $I_A$ ,令  $M_A = A_{\max} + A_{\text{mid}} + A_{\min}$ ,则

$$g(u_1) = \frac{A_{\min}}{M_A}, g(u_2) = \frac{A_{\text{mid}}}{M_A}, g(u_3) = \frac{A_{\max}}{M_A} \quad (6)$$

同样,对图像  $I_B$ ,令  $M_B = B_{\max} + B_{\text{mid}} + B_{\min}$ ,则

$$g(s_1) = \frac{B_{\min}}{M_B}, g(s_2) = \frac{B_{\text{mid}}}{M_B}, g(s_3) = \frac{B_{\max}}{M_B} \quad (7)$$

在实际应用中,也可根据不同的规则构造信度函数及模糊测度,以适应实际的需求。

⑨ 融合算子的确定

对图像  $I_A, C_1 = \sum_{i=1}^3 g(h_{\partial_i})(h(u_i) - h(u_{i-1})),$   
 其中,  $h_{\partial_i} = \{u_i, u_{i+1}, \dots, u_n\}, h(u_0) = 0 \quad (8)$

对图像  $I_B, C_2 = \sum_{i=1}^3 g(h_{\partial_i})(h(s_i) - h(s_{i-1})),$   
 其中,  $h_{\partial_i} = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_n\}, h(s_0) = 0 \quad (9)$

记融合后的小波系数为  $W(p)$ ,则

$$W(p) = \begin{cases} W(I_A, p) & \text{if } C_1 \geq C_2 \\ W(I_B, p) & \text{if } C_1 < C_2 \end{cases} \quad (10)$$

Choquet 模糊积分值  $C$  值越大,说明局部窗口内的方差、平均梯度及能量信息综合程度越大,这样可以避免单独依据单个指标来进行系数选择所造成的误差,使小波系数的选择更加准确。若选择不同的单因素指标集,可相应地对信度函数  $h$  和模糊测度  $g$  进行适应性变化,得到新综合指标进行选择。

4 融合实验及性能评价

MS 图像和 PAN 图像的融合中,本文采用的 MS 图像为 Landsat5 TM (Thematic Mapper) 图像(空间分辨率 30m),PAN 图像为 SPOT 图像(空间分辨率 10m),原始多光谱 TM 图像如图 1,原始高分率 SPOT 图像如图 2。



图 1 原始 TM 图像

图 2 原始 SPOT 图像

Fig. 1 Original TM images

Fig. 2 Original SPOT image

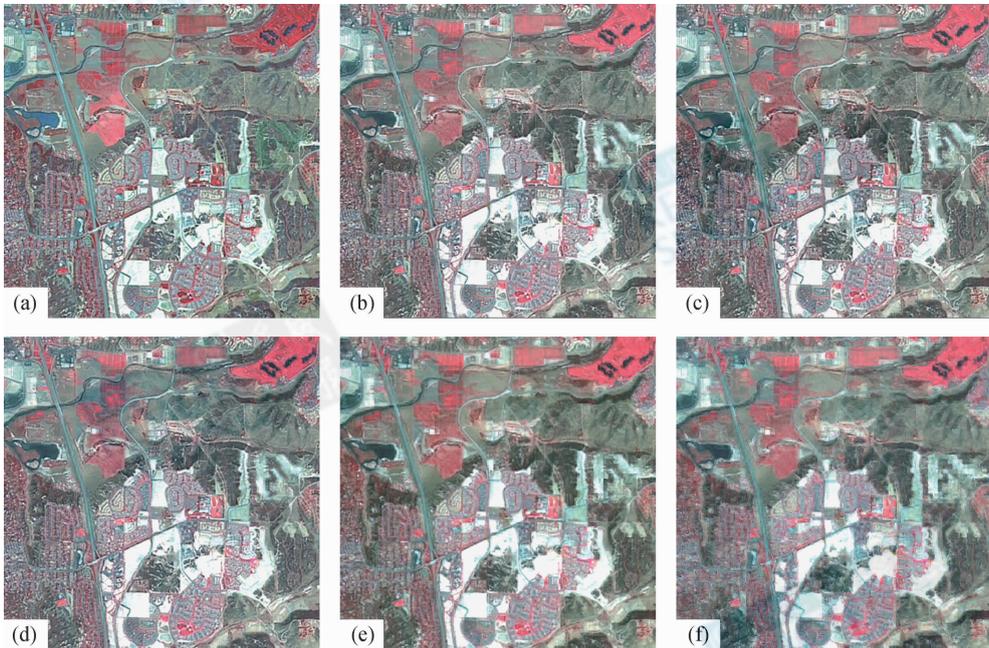


图 3 各算法融合结果图

(a) IHS 融合; (b) DWTV 法融合; (c) DWTG 法融合; (d) DWTE 法融合;  
 (e) 石爱业 & 徐立中(2007)算法融合; (f) 本文算法融合

Fig. 3 Resulting images fused by different methods

(a) fused by IHS-based; (b) fused by DWTV-based; (c) fused by DWTG-based; (d) fused by DWTE-based;  
 (e) fused by the method proposed by Shi & Xu (2007); (f) fused by the method proposed in this paper

下述的 IHS 融合方法、基于离散小波变换的方差最大值法(DWTV)、基于离散小波变换的梯度最大值法(DWTG)、基于离散小波变换的能量最大值法(DWTE)、石爱业 & 徐立中(2007)的算法以及本文方法的实验是针对 TM 和 SPOT 进行融合的。实验中小波分解的层数选为 3, 窗口大小为  $3 \times 3$ 。各算法的融合图像分别如图 3(a)–(f), 图 4(a)–(f) 为各算法的局部放大图, 选取图像为原图像左上角  $256 \times 256$  大小的

图像部分。

从主观观察图 3(a)–(f) 可以看出, 各融合结果图在空间分辨率上相差不大, 并且与融合前的多光谱图像 TM 相比均有了明显的提高。

图 4(a)–(f) 为各算法的局部放大图, 可以看出 IHS 变换算法空间分辨率最高, 但存在着明显的色彩畸变, 与 DWTV, DWTG, DWTE 算法相比, 石爱业 & 徐立中(2007)的算法与本文算法空间分辨率略差, 但保持了较好的色彩信息。

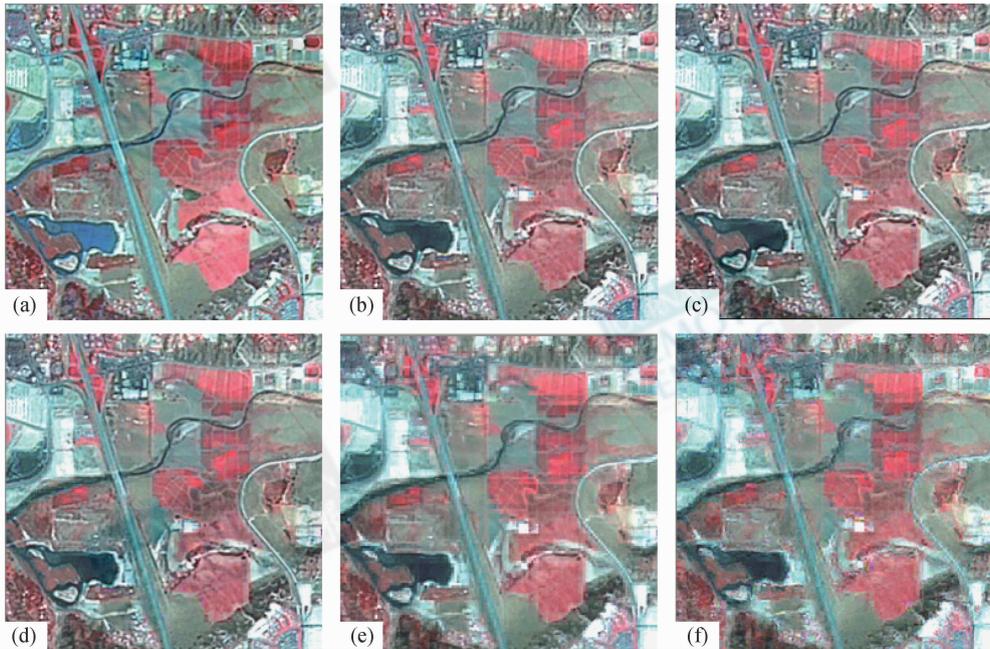


图 4 各算法融合结果局部放大图

(a) IHS 变换局部放大图; (b) DWTV 法局部放大图; (c) DWTG 法局部放大图; (d) DWTE 法局部放大图; (e) 石爱业 & 徐立中(2007)算法局部放大图; (f) 本文算法局部放大图

Fig. 4 Local images fused by different methods

(a) local images fused by IHS-based; (b) local images fused by DWTV-based ; (c) local images fused by DWTG-based; (d) local images fused by DWTE-based;

(e) local images fused by the method proposed by Shi & Xu (2007); (f) local images fused by the method proposed in this paper

#### 4.1 融合图像的光谱质量

引入如下衡量融合图像光谱质量的参数:

(1) 相关系数 (Correlation Coefficient, CC), 是指融合图像的各波段和原始多光谱图像 TM 的对应波段之间相关系数, 融合结果光谱信息保持越多, CC 越接近于 1, 理想的情况应该是 1。

(2) 扭曲程度 (Distortion Degree, DD), 是指融合图像和原始多光谱图像的像素值误差, 直接反映了多光谱图像的光谱失真程度, 其定义如下:

$$DD_k = \frac{1}{K \times L} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L |I_F^k(i, j) - I_{MS}^k(i, j)|$$

$$k = R, G, B \quad (11)$$

式中,  $K \times L$  是指图像大小。

平均扭曲程度定义为:

$$DD = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n DD_k \quad (n \text{ 为融合图像波段数}) \quad (12)$$

DD 的值越小, 代表融合过程中的光谱损失越小。

(3) 偏差指数 (Deviation Index, DI): 偏差指数用来比较融合影像和多光谱低分辨率影像的偏离程度, 其定义如下:

$$DI^k = \frac{1}{K \times L} \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \frac{|I_F^k(i, j) - I_{MS}^k(i, j)|}{I_{MS}^k(i, j)}$$

$$k = R, G, B \quad (13)$$

平均偏差指数定义为:

$$DI = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n DI^k \quad (n \text{ 为融合图像波段数}) \quad (14)$$

DI 的值越小,表明融合图像与多光谱图像的综合光谱信息差异越小。

文中上述各方法的光谱指标值如表 1。

表 1 各种融合算法得到的融合图像的光谱质量比较

Table 1 Comparison of spectral quality of the resulting images

项 目	CC	DD	DI		
-	B 波段	G 波段	R 波段	-	-
DIHS	0.7436	0.8243	0.6704	9.3840	0.1581
DWTV	0.8651	0.8639	0.8173	7.9935	0.1337
DWTG	0.8711	0.8686	0.8345	6.8892	0.1252
DWTE	0.8676	0.8667	0.8210	7.9189	0.1326
石爱业 & 徐立中 (2007)算法	0.9286	0.9428	0.8944	5.5390	0.0932
本文算法	0.9194	0.9460	0.9055	5.0728	0.0859
理想数值	1	1	1	0	0

由表 1 可知,传统的 IHS 算法的光谱参数 CC 较小,DD 和 DI 较大,这表明融合图像有较大的光谱失真。这是由于在 IHS 变换融合方法中,直接采用全色图像替换多光谱图像的强度分量,而强度分量的光谱特性与全色图像的光谱特性并不完全一致导致了色彩的畸变。

由表 1 可以看出,DWTV 方法、DWTG 方法、DWTE 方法从总体上看光谱质量优于 IHS 变换方法;而与 DWTV 方法、DWTG 方法、DWTE 方法相比,本文算法的 CC 更接近于 1,DD 和 DI 更接近于 0,这表明融合图像的光谱综合信息较好,融合图像的光谱信息优于这 3 种依据单因素指标选择小波系数的方法。

由表 1 还可以看出石爱业 & 徐立中(2007)算法和本文算法较几种传统方法的光谱特性有明显的改善,而本文方法与石爱业 & 徐立中(2007)算法相比,除了 B 波段的相关系数略差以外,其他光谱参数均优于该算法。以上分析表明本文算法在光谱质量改善方面优于其他算法。

#### 4.2 融合图像的空间细节质量

引入高通滤波相关系数衡量融合图像空间细节特征,定义如下(Zhang et al.,2006):

$$HCC_k = \text{Corr}((H(I_f^k), H(I_{pan}^k))) \quad k = R, G, B$$

$$\text{Corr}(A, B) = \frac{E\{[A - E(A)][B - E(B)]\}}{\sqrt{D(A)} \sqrt{D(B)}} \quad (15)$$

式中,H 代表高通滤波。

该指标是指融合图像和 PAN 图像经高通滤波后的相关系数,代表融合图像从 PAN 图像中提取的细节特征的大小,该值越大,表明空间细节特征提高越大。本文方法的 R,G,B3 个波段的高通滤波相关系数如下:0.8638,0.8530,0.6995。单从视觉角度观察图 3(a)~(f),实验中所有算法的融合图像在空间细节质量方面比原始光谱图像有所提高,且各融合算法结果的空间细节质量很接近,但是由于本文算法的融合图像的光谱质量较好,而 MS 图像与 PAN 图像融合时,要求在提高融合图像的空间细节质量的同时,尽可能保持融合图像具有原始 MS 图像的信息,这表明本文的算法是可行的。

### 5 结 论

本文提出了一种利用图像的 IHS 变换和多分辨率小波分解,采用基于模糊积分选择融合算子的遥感图像融合方法,该方法将高频局部窗口内的方差、平均梯度及能量有效地结合起来进行小波系数选择,不仅考虑了这 3 个单因素指标的客观信息,同时考虑了三者的重要程度。实验结果表明,本文算法在保证一定的空间细节质量的基础上,在光谱质量的改善方面明显优于 IHS,DWTV,DWTG,DWTE 等传统算法,是一种有效的遥感图像融合算法。此外,可根据实际需要改变单因素指标集,也可对信度函数和模糊测度进行适应性变化,得到新的综合指标。

### REFERENCES

Li H, Manjunath B S and Mitra S K. 1995. Multisensor image fusion using the wavelet transform. *Graphical Models and Image Processing*, **57**(3):235—245

Murofushi T and Sueno M. 1989. An interpretation of fuzzy measure and the choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure. *Fuzzy Sets and Systems*, **29**(2): 201—227

Shi A Y and Xu L Z. 2007. Remote-sensed images fusion using fuzzy density determined adaptively based on wavelet transform. *Journal of Electronics and Information Technology*, **29**(2):355—359

Xu B C and Chen Z. 2004. Image fusion effect evaluation based on fuzzy choquet integration. *Opto-Electronic Engineering*, **31**(11):42—46

Yang L B and Gao Y Y. 1995. *Fuzzy Mathematic Principle and Application*. Guangzhou: South China University of Technology Press.

Yocky D A. 1995. Image merging and data fusion by means of the discrete two dimensional wavelet transform. *Journal of the Optical Society of America*, **12**(9):1834—1841

Zhang Y F, He M Y, Weng M Y, Wen C Y and Leroy S. 2006. Multi-spectral and panchromatic image fusion based on local information

entropy and its distribution property. International Conference on Industry of Electronics and Application. Singapore, May. 1—6

### 附中文参考文献

石爱业,徐立中. 2007. 一种自适应模糊密度赋值的小波变换

遥感图像融合算法. 电子与信息学报, **29**(2):355—359  
杨伦标,高英仪. 1995. 模糊数学原理及应用. 广州:华南理工大学出版社

徐宝昌,陈哲. 2004. 基于模糊 Choquet 积分的图像融合效果评价. 光电工程, **31**(11):42—46

## Remote sensing images fusion based on wavelet coefficients selection using choquet fuzzy integral

LING Jing, XU Li-zhong, SHI Ai-ye, HUANG Feng-chen, TANG Min

*College of Computer and Information Engineering, HeHai University, Jiangsu Nanjing 210098, China*

**Abstract:** In order to decrease the spectral distortion while improving the spatial resolution during the fusion of remote sensing images, an image fusion method based on Choquet fuzzy integral is proposed in this paper. Firstly, an intensity-hue-saturation (IHS) transform is performed for multispectral images. Then the panchromatic image and the intensity component of multispectral images are decomposed using discrete wavelet transform respectively. In the wavelet domain, for the low-frequency component, the wavelet coefficients of the *I* component are selected directly. For the high-frequency component, the wavelet coefficients are selected according to an integrative index which is colligated with the values of variation, average gradient and energy in the local region by Choquet fuzzy integral. Further, the fused intensity component is obtained by inverse discrete wavelet transform. Finally, the fused images are obtained by inverse IHS transform. The experiment results demonstrate our proposed method effectively.

**Key words:** remote sensing images fusion, wavelet transform, fuzzy integral, IHS transform