

采用局部谐波能量的图像融合准则研究

玉振明¹,毛士艺²,高 飞²

(1. 广西大学梧州分校,广西梧州 543002;2. 北京航空航天大学 203 教室,北京 100083)

摘 要: 本文提出了一种新的图像融合准则:在用金字塔和小波分解的图像融合中对其中的高频子图进行局部傅里叶变换,求出其频谱中谐波能量,然后以谐波能量和低频子图中相应区域能量的比值作为像素取舍的判据.文中把这种规则用于多聚焦图像的融合和不同波段卫星遥感图像的融合实验,实验表明本文提出的融合准则对这些类型的图像融合是有效的,在某些方面优于通常的融合准则.

关键词: 图像融合;傅里叶变换;谐波能量;图像金字塔;小波变换

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 06-0890-05

A Study on Rule of Image Fusion Via Localized Harmonious Energy

YU Zhen-ming¹, MAO Shi-yi², GAO Fei²

(1. Wuzhou Branch Guangxi university, Wuzhou, Guangxi 543002, China;

2. Group 203 Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper proposes a new rule of image fusion. We start with taking local Fourier Transform of high frequency sub-images in image fusion based on the pyramid and Wavelet Transform, get their harmonious energy, then consider the ratio of these energy and the energy of the corresponding area in the low frequency image as the rule of pixels choice. We apply the rule in multi-focus image fusion and multi-band remote sensing image fusion and conclude that the efficient fusion rule is better than current principle in some fields.

Key words: image fusion; fourier transform; harmonious energy; image pyramid; wavelet transform

1 引言

近年来有不少学者提出了各种图像融合方法,归结起来在像素级融合方法中占主流地位的是源于多分辨率的方法,一类是基于图像的高斯金字塔分解,然后派生出拉普拉斯金字塔,比率金字塔,梯度金字塔等方法^[1-3];另一类是基于小波分解的算法.它们的基本思想都是把图像分解到不同分辨率下的一系列子图像,然后在每一级子图像上进行融合,得到融合后的子图像序列后再进行重构.在融合过程中,融合的准则对融合质量也至关重要,通常的融合准则有:在基于金字塔的方法中,在得到图像的拉普拉斯金字塔后,在每一级拉普拉斯金字塔中选取灰度值大的像素.规则的意义在于每一级拉普拉斯金字塔都是相应级里的高频部分,灰度大的像素应是特征明显的像素;另一种基于金字塔的融合方法是生成一个高频图像和相应低频图像之比的图像序列,即所谓比率金字塔,然后在比率金字塔每一级里取对比度大的像素进行融合,这种准则的意义在于反映了图像的对比度,对比度大的地方应是图像特征明显的地方.基于小波变换的融合准则同样也来自上述思想,由于小波变换的图像序列中每一级包含一个低频的模糊子图像和三个行、列、对角线方向上的高频细节子图像,通常的融合准则有:一、比较各个方向高频子图中的小

波系数的绝对值大小;二、比较每一个方向高频子图和低频子图的小波系数的比值大小^[4,5,7,8].

本文提出的融合规则是通过计算中心像素周围的一个小区域的傅里叶变换,取得这一区域的谐波能量,然后把这一区域的谐波能量和低频图像相应的区域能量相比,以这一比值作为融合准则.这样做的意义在于:用区域内的量比较代替了单个像素的量的比较,在一个区域内考察图像应更能反映图像的特征和趋势;傅里叶变换后谐波能量的大小反映了图像在这一区域内的变化程度,即反映边缘和细节成分的多少,因此在融合中能突出图像细节即高频成份的差异,从而尽可能在融合图像中保存高频细节成份,使融合后的图像信息更为丰富.实验表明本文的规则是有效的.

2 图像的傅里叶变换及其频谱的意义

设图像某局部区域为: $f(m, n)$, $(m \leq K, n \leq L)$, K, L 为所取的局部区域大小.则 $f(m, n)$ 的二维离散傅里叶变换是:

$$F(u, v) = \frac{1}{KL} \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{L-1} f(m, n) \exp[-j2\pi(um/K + vn/L)],$$
$$u=0, 1, \dots, K-1; v=0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

空域 $f(m, n)$ 变换到频域 $F(u, v)$ 后,频率 $F(u, v)$ 的分布直接反映出区域图像所包含的频率成份和各频率成份的能量大

小,因此其各次谐波能量的多少反映了这一区域图像所包含的各种频率细节的丰富程度.

事实上,虽然频域 $F(u, v)$ 的分布已经不能直观反映图像空间点分布的信息,但频谱的分布却能反映空间中图像突起细节和纹理的走向和强度.例如

$$f(m, n) = \begin{bmatrix} a & a & \dots & b & \dots & a & a \\ a & a & \dots & b & \dots & a & a \\ a & a & \dots & \dots & \dots & a & a \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a & a & \dots & b & \dots & a & a \\ a & a & \dots & b & \dots & a & a \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式代表的局部图像(大小为 $L \times K$)在平坦的背景中只有垂直方向的边缘,它的傅里叶变换就具有式(3)的形式:

$$F(u, v) = \begin{bmatrix} F_{00} & F_{01} & \dots & F_{0K-1} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)表明因为空间只有列方向的变化,行频率分量 u 只有零频分量,所以除第零行外,其余各行都为零.同理可证明只有行方向变化和对角线方向变化的局部图像有如下特征的频谱.

$$\begin{bmatrix} F_{00} & 0 & \dots & 0 \\ F_{01} & 0 & \dots & 0 \\ F_{02} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ F_{L-1} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{00} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & F_{01} \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & F_{K-23} & 0 \\ 0 & F_{K2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{00} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & F_{11} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & F_{L-1K-1} \end{bmatrix}$$

上面三个频谱矩阵中分别对应图像特点是:只有行方向的、只有 135 度对角线和 45 度对角线方向的边缘和纹理或突起.

3 在金字塔方法中运用谐波能量融合准则

金字塔融合方法主要有拉普拉斯金字塔和比率金字塔,它们都源于图像的高斯金字塔分解,高斯金字塔的生成包含低通滤波和下采样的过程.设图像的第级高斯金字塔为 $G_l(m, n)$ ($m \leq M, n \leq N$) M, N 为图像的行、列数.则第 $l+1$ 级高斯金字塔由下式生成:

$$G_{l+1} = \sum_{m=-2n=-2}^2 w(m, n) G_l(2i+m, 2j+n), \quad i \leq N/2, j \leq M/2 \quad (4)$$

其中 $w(m, n)$ 为满足约束条件的生成核^[2],这是一个低通滤波和降采样的过程.第 $l+1$ 层尺寸是第 l 层尺寸的四分之一.定义一图像尺度减少算子 Reduce 则式(4)变成:

$$G_{l+1} = \text{Reduce}(G_l) \quad (5)$$

对原图像运用 $N-1$ 次这样算子就得到一个 N 层的高斯金字塔.图像的拉普拉斯金字塔的生成还要有一个和图像缩小相

反的扩大过程,这个过程就是把第 $l+1$ 级上采样扩大到第 l 级同样大尺度的过程.定义图像的扩大算子 Expand 为:

$$G_l^* = \text{Expand}(G_{l+1}) \quad (6)$$

G_l^* 和 G_l 同尺寸.具体运算是通过对第 l 级图像进行插值放大,由下式实现:

$$G_l^*(i, j) = 4 \sum_{m=-2n=-2}^2 w(m, n) G_{l+1}\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right), \quad 0 < l \leq N, 0 \leq i \leq C_L, 0 \leq j \leq R_L \quad (7)$$

上式中:

$$G_{l+1}\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) = \begin{cases} G_{l+1}\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right), & \text{当 } \frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \text{ 为整数} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

通过上式的插值运算把金字塔的第 $l+1$ 级图像扩大到和 l 级同尺寸,拉普拉斯金字塔定义:

$$\begin{cases} LP_l = G_l - \text{Expand}(G_{l+1}), & \text{当 } 0 \leq l < N \\ LP_N = G_N, & \text{当 } l = N \end{cases} \quad (8)$$

可见拉普拉斯金字塔实际就是高斯金字塔和其上一层通过插值扩大的差值图像,而最高级是高斯金字塔本身.由于上层图像是下层低通滤波下采样得到的,所以扩大后和原级的差值反映的是高斯金字塔两级间的信息差,也即拉普拉斯金字塔实际是同级高斯金字塔的高频分量.原图像可以由它的拉普拉斯金字塔完全重构,由式(8)可推得重构公式:

$$G_0 = LP_0 + \text{Expand}(LP_1 + \text{Expand}(LP_2 + \dots + \dots \text{Expand}(LP_N))) \quad (9)$$

基于拉普拉斯金字塔的融合准则是:

$$LP_{IF}(i, j) = \begin{cases} LP_{IA}(i, j), & \text{if } LP_{IA}(i, j) > LP_{IB}(i, j) \\ LP_{IB}(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

其中融合后的第级拉普拉斯金字塔为 LP_{IF} ,输入图像 A, B 的拉普拉斯金字塔分别是 LP_{IA} 和 LP_{IB} .融合后的拉普拉斯金字塔按式(9)重构得到融合图像.式(10)的融合准则意义在于每一级拉普拉斯金字塔代表了每一级图像的边缘细节,因此灰度值大的像素应是图像中边缘特征明显的像素.

基于金字塔融合的另一方法称为比率金字塔,比率金字塔的定义是:

$$\begin{cases} RP_l = G_l / \text{Expand}(G_{l+1}), & \text{当 } 0 \leq l < N \\ RP_N = G_N, & \text{当 } l = N \end{cases} \quad (11)$$

最高第 N 级比率度金字塔是其高斯金字塔本身,除此以外各级比率金字塔是这一级的高斯金字塔和上一级作扩大后之比.重构公式为:

$$G_0 = RP_0(\text{Expand}(RP_1(\text{Expand}(RP_2 \dots \dots \text{Expand}(RP_N)))))) \quad (12)$$

比率金字塔的融合准则是:

$$RP_{IF}(i, j) = \begin{cases} RP_{IA}(i, j), & \text{if } |RP_{IA}(i, j) - 1| > |RP_{IB}(i, j) - 1| \\ RP_{IB}(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad (13)$$

融合准则的意义在于突出了对比度,对比度大的像素应在图像中相对突出和比较重要的像素,对比度的定义是:

$$C = (g - g_b) / g_b = g / g_b - 1$$

g 为图像某处的灰度值, g_b 为该位置处背景灰度值, 1 为单位灰度值,式(13)的融合准则由此引出.

上述经典的融合准则都是考虑单个像素的特征,而更能反映图像特征应是从一个区域来考察,而所谓特征明显应是这一区域内图像的灰度变化较大.基于这样的考虑在拉普拉斯金字塔方法中以所考察像素为中心取一个小区域进行傅里叶变换,在比率金字塔方法中这样的操作则在原高斯金字塔中进行.然后求出其谐波部分能量.设所取的区域大小为 $K \times L$,则第 k 次以上的谐波能量为:

$$E_h = \sum_{u=k}^{K-L} \sum_{v=k}^{L-L} |F(u, v)|^2 \quad (14)$$

受对比度融合准则的启发,不直接比较谐波能量,而用上述谐波能量与对应的背景低频能量相比,显然第 l 级图像的低频背景图像应理解为 G_l^* 即 $Expand(G_{l+1})$,低频背景图像中中心在 (i, j) 相应区域的能量由下式表示:

$$E_l = \sum_{m=-n}^n \sum_{n=-n}^n w(m, n) G(i+m, j+n)^2 \quad (15)$$

其中 $w(m, n)$ 为权值,可取高斯分布.这样拉普拉斯金字塔中的融合准则变为:

$$LP_{IF}(i, j) = \begin{cases} LP_{IA}(i, j), & \text{if } E_{Ah}/E_{Al} > E_{Bh}/E_{Bl} \\ LP_{IB}(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad (16)$$

而比率金字塔中的融合准则变为:

$$RP_{IF}(i, j) = \begin{cases} RP_{IA}(i, j), & \text{if } E_{Ah}/E_{Al} > E_{Bh}/E_{Bl} \\ RP_{IB}(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad (17)$$

4 在小波变换中运用谐波能量融合准则

设 $V_j^2(j, Z)$ 是二维空间 $L^2(R^2)$ 一个可分离的多分辨率分析,尺度函数 $\{ \varphi_{j, m_1, m_2} | (m_1, m_2) \in Z \}$ 构成 V_j^2 的规范正交基,小波函数系 $\{ \psi_{j, m_1, m_2} | 1, 2, 3; m_1, m_2 \in Z \}$ 刚构成 $L^2(R^2)$ 的规范正交基.对于图像 $f(x, y) \in V_j^2$,可用它在 V_j^2 中的投影 $A_j f(x, y)$ 来表示:

$$f(x, y) = A_j f(x, y) = A_{j+1} f + D_{j+1}^1 f + D_{j+1}^2 f + D_{j+1}^3 f \quad (18)$$

$$\text{其中} \begin{cases} A_{j+1} f = \sum_{m_1, m_2} C_{j+1, m_1, m_2} \varphi_{j+1, m_1, m_2} \\ D_{j+1}^1 f = \sum_{m_1, m_2} D_{j+1, m_1, m_2}^1 \psi_{j+1, m_1, m_2}^1 \\ D_{j+1}^2 f = \sum_{m_1, m_2} D_{j+1, m_1, m_2}^2 \psi_{j+1, m_1, m_2}^2 \\ D_{j+1}^3 f = \sum_{m_1, m_2} D_{j+1, m_1, m_2}^3 \psi_{j+1, m_1, m_2}^3 \end{cases} \quad (19)$$

设 H_r, G_r 和 H_c, G_c 为互相镜像共轭的滤波器. H, G 分别作用在行和列上,式(19)表示成:

$$\begin{aligned} C_{j+1} &= H_r H_c C_j, & D_{j+1}^1 &= H_r G_c C_j, \\ D_{j+1}^2 &= G_r H_c C_j, & D_{j+1}^3 &= G_r G_c C_j \end{aligned} \quad (20)$$

这就是 Mallat 的分解算法.重构算法为:

$$C_j = H_r^* H_c^* C_{j+1} + H_r^* G_c^* D_{j+1}^1 + G_r^* H_c^* D_{j+1}^2 + G_r^* G_c^* D_{j+1}^3 \quad (21)$$

每一级图像的分解得到四个子图,由于 H_r, G_r 相当于低通和高通滤波器,所以 C_{j+1} 是 C_j 的低频子图,而 D_{j+1}^1 是对列作平滑而对行进行高频滤波,所以是 C_j 的行方向高频子图,即这个子图内行方向的边缘应突出.同理 D_{j+1}^2 和 D_{j+1}^3 分别是列方向和对角线方向的高频子图,其内列方向边缘和对角线方向边缘应占突出地位.通常的小波分解的融合准则和金字塔方法相仿,通常有在每一级每一个高频子图中比较其小波系数,然后取绝对值大的,即:

$$D_{IF}(i, j) = \begin{cases} D_{IA}(i, j), & \text{if } |D_{IA}(i, j)| > |D_{IB}(i, j)| \\ D_{IB}(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad (22)$$

其中 $l=1, 2, 3, l$ 是级数, A, B, F 分别是输入图像和融合图像.另一种是由比率金字塔推广的准则,即计算每一个高频子图小波系数与低频子图中的小波系数之比.取比值绝对值大的像素.即:

$$D_{IF}(i, j) = \begin{cases} D_{IA}(i, j)/C_l(i, j), & \text{if } |D_{IA}(i, j)/C_l(i, j)| > |D_{IB}(i, j)/C_l(i, j)| \\ D_{IB}(i, j), & \text{other} \end{cases} \quad (23)$$

而对最高级低频子图都是对其取加权平均.

本文在金字塔方法中的融合准则完全可以直接应用到小波分解方法中.但考虑到小波分解的高频子图的特点,又可以作进一步的改进.从本文第二部分可看到,边缘方向性明显的区域中,其频谱矩阵中有相应占优势的行列分布,因此为了突出小波分解不同方向高频子图的特点,在计算高频子图局部区域谐波能量时,对边缘沿行、列和对角线走向时影响最大的频谱中相应的频率成份的能量进行加权.如对于行方向的高频子图,对频谱中第零列元素对应的能量进行加权,而对列方向高频子图则对频谱第零行能量进行加权.高频子图局部区域谐波能量由下式计算:

$$E_h = E_{h1} + kE_{h2} \quad (24)$$

其中第一部分计算和式(14)相同,第二部分是强调边缘走向的相关部位, k 是加权系数.低频子图相应区域能量的计算同样用式(15).

5 融合实验和性能评价

选用了两类差异很大的图像进行融合,在所有的实验中局部区域的大小均选 5×5 小方格,方格选得太小不能很好反映局部特征,太大则会和中心像素偏离太远,且计算量增大.实验表明在 $5 \times 5, 7 \times 7$ 中选择对融合效果不敏感,故方格大小取 5×5 .第一类是不同聚焦图像的融合,这类图像灰度差异较小,如图 1(a) 和 1(b) 所示,前者前景清晰而远景模糊,后者刚好相反,图 1(c) 是标准图像.由于图 1 所选的图像是标准图像,所以融合效果用融合后的图像和标准图像的均方差来衡量.图 1 中的 (d) 和 (f) 分别是典型拉普拉斯金字塔和比率金字塔融合的结果,可见典型的拉普拉斯金字塔和比率金字塔都能取得较好的效果,误差见表 1.用本文准则的拉普拉斯金字塔方法和比率金字塔方法也取得较好效果,误差见表 1,融合的图像见图 1 中的 (e)、(g) (取二次以上谐波能量),视角效果上和典型的拉普拉斯和比率金字塔相差不多,从误差看用本文准则的拉普拉斯金字塔误差略为增大,而用本文准则的比率金字塔误差却明显减少.实验还发现取多少次以上的谐波能量和融合效果有一定关系,但并不很敏感,表 2 是在

表 1 各种方法用于不同聚焦图像融合的误差情况

方法	拉普拉斯金字塔	改进拉普拉斯金字塔	比率金字塔	改进比率金字塔	小波(高频系数取大)	小波(高频和低频比取大)	改进小波分解
误差	38	40.96	40.7	34.87	40.94	44.72	30.06

拉普拉斯金字塔中取不同次谐波能量的误差情况,可见,一般取二次以上谐波能量效果很好.

表 2 在拉普拉斯金字塔中取不同次以上谐波能量时误差情况

谐波次数	二次	三次	四次	五次
误差	40.96	40.87	41.70	45.57

图 1 (h)、1(i) 分别是小波分解用通常的 (22) 和 (23) 两种

融合准则的融合结果,而图 1(j) 是用本文融合准则融合的结果,其中谐波能量加权系数取 3. 可以看到小波分解融合的视角效果都较好,但本文方法的误差最小. 表 3 给出了谐波能量取不同权值时的误差情况. 可见不加权即时的误差比取适当权值的误差明显增大,这就验证了本文的思想,权值约取 3 时误差最小.

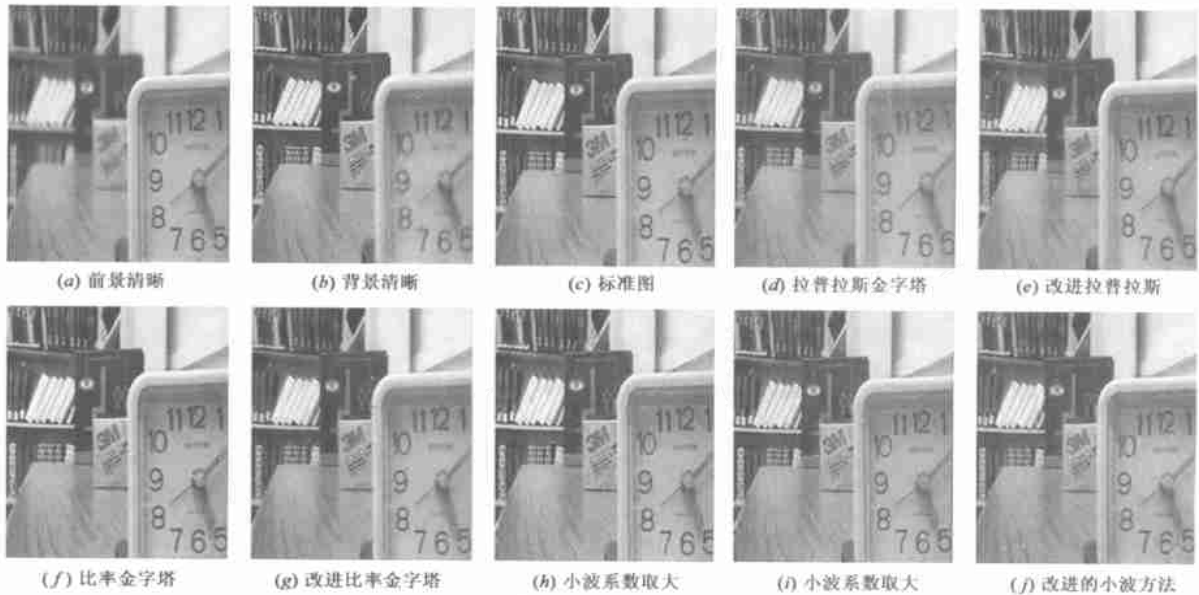


图 1 不同聚焦图像融合的结果

表 3 小波分解算法中取不同权值计算谐波能量时的误差情况

权值系数 (k)	0	2	3	4	5	6
误差	38.42	31.07	30.06	35.35	35.45	35.58

图 2 (a)、2(b) 是蓝光波段和红外波段上海某地区的卫星遥感图像,图 2(c) 和 2(e) 分别是典型拉普拉斯金字塔和比率金字塔的融合结果,可以看到典型比率金字塔融合带来了很大的灰度变化,这是因为比率金字塔的重构是乘法关系,来自

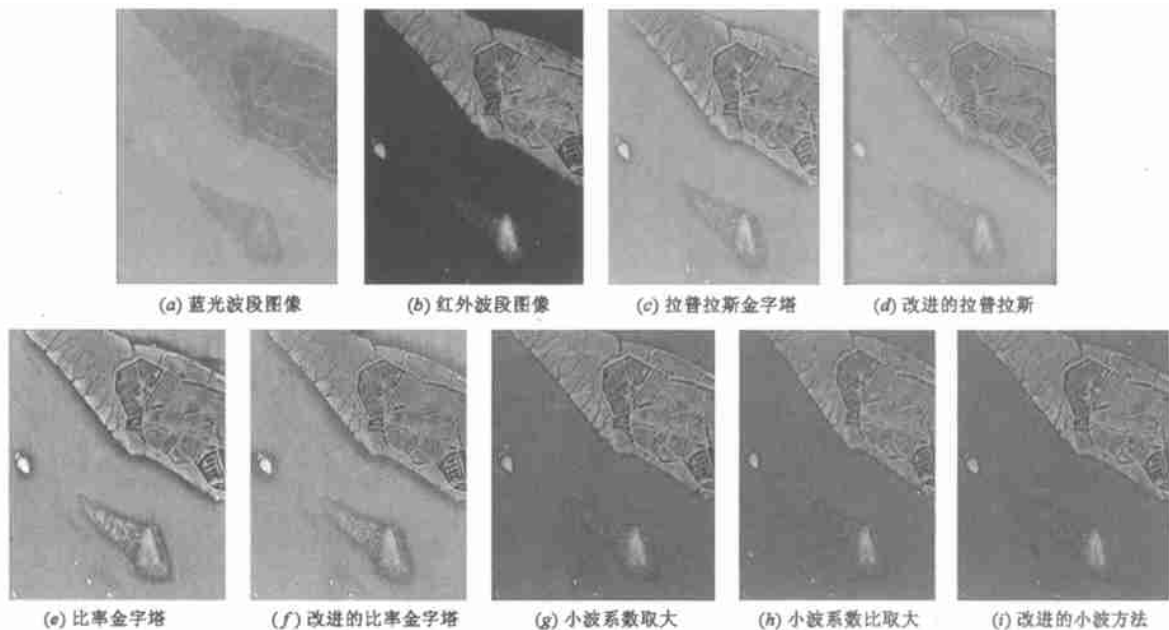


图 2 不同波段图像融合的结果

异源像素的灰度变化经过一级级相乘后放大了,可见比率金字塔特别适用于融合灰度差不大的图像,不同聚焦图像正是这一类图像,所以在实验中融合图像灰度没有明显失真,但在灰度差异较大的遥感图像的融合中灰度就会有明显的失真.图 2(d)、2(f)分别是本文提出的融合准则用于拉普拉斯和比率金字塔的融合结果.可以看到改进的比率金字塔灰度失真比典型比率金字塔方法融合的灰度失真要小.而运用本文准则的拉普拉斯方法比典型的拉普拉斯方法融合结果的改善更加明显,对比图 2(a)和图 2(c)中的道路就可看出融合图像中道路线段变粗和毛糙了一些.而用本文准则的拉普拉斯方法融合的图像 2(d)中的道路线段则清晰、光滑得多.2(g)和图 2(h)是小波分解按式(22)和(23)两种典型融合规则融合的结果,图 2(i)则是用本文的加权谐波能量准则融合的结果(权值取 7),可以看到这三种方法的融合效果主观视角差别很小,应该说都能取得很好的融合效果.

表 4 对多波段遥感图像不同融合方法的熵和交叉熵

方法	拉普拉斯金字塔	改进拉普拉斯金字塔	比率金字塔	改进比率金字塔	小波(高频系数取大)	小波(高频和低频比取大)	改进小波分解
熵	3.64	3.73	4.06	3.91	3.39	3.37	3.33
平均交叉熵	2.72	2.43	2.97	2.95	4.09	4.06	4.10

由于没有标准的图像比较,所以融合效果的客观评价用现在常用的图像的熵和图像之间的交叉熵来衡量,熵和交叉熵的定义见文献[9],认为融合图像的熵越大信息量越多,因此融合质量越好,而和输入图像的均方或平均交叉熵越小则效果越好,表 4 给出了几种方法的熵和交叉熵(谐波能量取二次以上).从这两个量来看本文的融合准则在对这一类遥感图像的融合中用拉普拉斯金字塔是占优的,在比率金字塔和小波分解中和典型的融合方法相差不多.从这两个指标也可看到对这类图像的融合小波分解的方法并不比金字塔的方法好.值得指出的是图像融合质量目前还没有真正可靠的客观评价指标,和标准图像的误差本来是能说明融合质量的,但在实际应用中标准图像几乎不可能存在.

6 结论

本文的主要结论有:

(1) 提出了一种新的图像融合准则,它是在基于金字塔和小波分解的融合中计算高频子图局部区域的傅里叶变换从而求出这一区域的谐波能量,用谐波能量和低频子图中相应的区域能量相比,以此比值作为融合准则.

(2) 在小波分解的融合算法还对准则进行了改进,根据各个高频子图边缘走向的特点,求谐波能量时加大了和边缘走向相关的频率成份的能量的权值.

(3) 本文通过对两类差异很大图像的融合实验证明了所提出融合准则的有效性,实验表明,在不同聚焦图像融合中,本文所提出的融合准则在比率金字塔和小波分解方法中表现占优,在拉普拉斯金字塔中和典型的融合准则表现相差不多;在不同波段的遥感图像融合中也有良好的表现,特别是在拉

普拉斯金字塔的融合算法中运用本文的准则融合效果得到了很大的改善.

参考文献:

- [1] Toet A, Van Ruyven L J, Valetton J M. Merging thermal and visual image by a contrast pyramid[J]. Optical Engineering, 1989, 28: 789 - 792.
- [2] Peter J Burt, Edward H Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. IEEE Transaction on communications, 1983, Comr 31: 532 - 540.
- [3] Aleaander Toet. Multiscale constrast enhancement with application to image fusion[J]. Optical Engineering, 1992, 31: 1027 - 1031.
- [4] Wu Xiu-qing, Zhou Rong, Xu Yun-xiang. A method of wavelet-based edge detection with data fusion for multiple images[A]. IEEE Proceeding of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. China: IEEE, 2000.
- [5] Dongmei Yan, Zhongming Zhao. Wavelet decomposition applied to image fusion Infor-tech and Infor-net[A]. Proceedings. ICII 2001-Beijing. 2001 International Conferences on[C]. Beijing, ICII, 2001.
- [6] 倪国强. 多波段图像融合算法及其新发展() [J]. 光电子技术与信息, 2001, 10(5): 11 - 17.
- [7] 倪国强. 多波段图像融合算法及其新发展() [J]. 光电子技术与信息, 2001, 12(6): 1 - 6.
- [8] 蒲恬, 方庆, 倪国强. 基于对比度多分辨率图像融合[J]. 电子学报, 2000, 12(12): 116 - 118.
- [9] 刘喜贵, 杨万海. 基于多尺度对比度的图像融合方法及性能评价[J]. 光学学报, 2001, 11(11): 1337 - 1342.

作者简介:



玉振明 男, 1963 年 6 月生于广西藤县, 广西大学梧州分校计算机科学系副教授, 现为北京航空航天大学电子信息工程系博士生, 从事图像处理、信号处理理论等方面的研究.

毛士艺 男, 1935 年生于浙江省, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 博士生导师, 中国电子学会(CIE)会士, 主要研究领域为: 高分辨率雷达成像, 信号建模与谱分析, 信号检测与分类, 多目标跟踪与数据融合等.



高飞 男, 1975 年生于陕西绥德, 现为北京航空航天大学电子工程系信号与信息处理教研室在校博士生, 主要从事信号处理、雷达成像、图像处理、运动目标指示等方面的研究工作.