

文章编号: 1007-4619(2007)01-0062-07

基于多分辨率分析的灰度调制 影像融合方法研究

林 卉¹, 张连蓬¹, 张庆利¹, 肖剑平²

(1. 徐州师范大学 国土信息与测绘工程系, 江苏 徐州 221116; 2. 武汉市勘测设计研究院, 湖北 武汉 430022)

摘 要: 在遥感图像处理中, 由于应用的需要, 已经有很多算法可以用来融合高分辨率的全色影像和低分辨率的多光谱影像。本文阐述了小波变换的 Mallat 算法和 a^tTrous(多孔)算法, 在此基础上, 作者提出了一种基于多分辨率分析的灰度调制影像融合方法 (MRAGM 算法), 以 SPOT 全色影像与 TM 多光谱影像融合为例, 详细给出了算法和解算步骤, 最后分别用三种方法对 SPOT 高分辨率全色影像和 TM 低分辨率多光谱影像进行了融合, 并且对融合后的影像从定性和定量方面都进行了评价, 可以得出 MRAGM 方法比 Mallat 算法和 a^tTrous(多孔)算法的融合效果要好。

关键词: 影像融合; 多分辨率分析; MRAGM 算法; 影像融合评价

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Image Fusion Research on the Basis of Multi-resolution Analysis Grey Modulation

Lin Hui¹, Zhang Lian-peng¹, Zhang Qing-li¹, Xiao Jian-ping²

(1. School of Geodesy and Geomatics of Xuzhou Normal University, Jiangsu Xuzhou 221116, China;

2. Wuhan design and research institute of exploration and surveying, Hubei Wuhan 430022, China)

Abstract In the course of remote sensing image processing in order to meet the application needs now many algorithms have been provided for the fusion between high-resolution panchromatic image and low-resolution multi-spectral image. This paper infers Mallat algorithm and a^tTrous(porous algorithm) algorithm theoretically, then provides specific calculation procedure. On the basis of them, multi-resolution analysis grey modulation(MRAGM algorithm) is put forward at the same time, taking the fusion between SPOT image and TM image as an example. At last, three kinds of method are used for image fusion between SPOT high-resolution panchromatic image and TM low-resolution multi-spectral image respectively, and the fused image has been evaluated from qualitative and quantitative aspect. The conclusion is drawn that the new method proposed in this paper is better than other kinds of fusion algorithm.

Key words image fusion; multi-resolution analysis; MRAGM algorithm; image fusion evaluation

1 引 言

在遥感图像处理中, 由于应用的需要, 已经有很

多算法可以用来融合高分辨率的全色影像和低分辨率的多光谱影像。融合算法的发展大体经过了三个阶段: 传统的简单融合方法、基于塔式分解和重建算法的融合方法、以及基于小波变换的影像融合方法。

收稿日期: 2004-09-30; 修订日期: 2006-05-10

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(编号: 04KJD420193)和徐州师范大学重点基金(编号: 04XLA12)。

作者简介: 林 卉(1973-), 男, 讲师, 2001年毕业于武汉大学摄影测量与遥感专业, 获工学硕士学位, 现从事遥感图像边缘提取、图像融合、InSAR 技术的研究工作。已发表论文章 30 余篇, 合编教材 3 部。E-mail: linhuixznu@126.com。

其中有的算法只是追求把两种信息综合在一体,以提高信息含量,并不要求在提高分辨率的同时保持色调一致,如 RGB 假彩色合成、PCA 主分量变换、乘积与线性复合等方法^[1,2]。然而大多数应用如地质找矿、土地资源的动态监测等,尤其是定量遥感分析,则要求在提高分辨率的同时保持色调一致。基于这一点,从应用的角度又有许多算法被提出,如 HIS 彩色变换、比值变换、Brovey 变换、HPF 高通滤波、高通调制技术以及基于 Mallat 算法和 a'Trous (多孔)算法的小波变换融合方法等^[3-7],但这些方法仍然没有找到如何在提高分辨率的同时保持色调一致的最佳结合点。作者认为一种好的融合方法必须考虑传感器影像的成像过程所包含的物理基础,基于传感器成像机理设计的融合方法才具有针对性。本文从理论上具体介绍了它们及其在融合中的应用,揭示了它们之间的联系和各自的优缺点,最后以卫星影像的成像机理为基础,作者推导出了基于多分辨率分析的灰度调制的影像融合方法,它克服了其他方法的局限性,融合时在提高分辨率的同时又保持了色调一致,把小波多分辨率分析技术在影像融合中的应用推上了一个新的台阶。

2 基于 Mallat 算法的遥感影像融合方法^[8,9]

Mallat 提出了小波的快速分解与重构算法,利用两个一维滤波器对二维图像实现快速小波分解,利用两个一维重构滤波器实现图像的重构。

若低通(H)和高通(G)为两个一维镜像滤波算子,其下标 r c 分别对应图像的行和列,按照 Mallat 算法,则在尺度 j-1 有如下分解公式:

$$\begin{cases} C_j = H_c H_r C_{j-1} \\ D_j^1 = G_c H_r C_{j-1} \\ D_j^2 = H_c G_r C_{j-1} \\ D_j^3 = G_c G_r C_{j-1} \end{cases} \quad (1)$$

与之对应的二维图像 Mallat 重构算法为:

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

式中, H^* , G^* 分别为 H, G 的共轭转置矩阵。

对图像 $f(x, y)$ 来说,算子 $H_c H_r$ 相当于二维低通滤波,因此 C_j 是 C_{j-1} 的低频成分。原始图像分解为 C_j, D_j^1, D_j^2, D_j^3 时, C_j 是原始图像在 2^{-j} 分辨率上的近似(粗糙像), $D_j^i (i=1, 2, 3)$ 则代表这种近似的

误差(即图像的高频部分或细节部分); D_j^1 对应垂直方向的高频部分, D_j^2 对应水平方向的高频部分, D_j^3 对应对角方向上的高频部分。Mallat 小波分解及重构算法表明,任何二维图像 $f(x, y) \in L^2(R)$ 都可分解为分辨率为 2^{-N} 下 $f(x, y)$ 的低频部分和分辨率为 $2^{-j} (1 \leq j \leq N)$ 下 $f(x, y)$ 的高频部分,并且可由以上部分完全重构原始图像。

3 基于 a'Trous (多孔)算法的遥感影像融合方法^[10-12]

信号与滤波器卷积后进行二抽取操作与对滤波器序列两点间插入适当零值后再作卷积相等价,这种方法称为多孔算法,可用以下伪代码表示:

$$J=0 \quad \text{while}(j < J) \{ S_{2^{j+1}} f(x, y) = S_{2^j} f(x, y) h_n^j \\ W_{2^{j+1}} f(x, y) = S_{2^{j+1}} f(x, y) g_n^j \quad J++ \}$$

式中, j 表示分解尺度, J 表示需要分解的最大尺度, $S_{2^j} f(x, y)$ 为概貌图, $S_{2^0} f(x, y)$ 为原始图像, $W_{2^j} f(x, y)$ 为细节图像, g_n^i 为 g_n 的相邻两项间插入 $2^i - 1$ 个零值, h_n^i 为 h_n 的相邻两项间插入 $2^i - 1$ 个零值。求取步骤如下:(1)对 $S_{2^j} f(x, y)$ 先用行与 h_n^j 作卷积,再用列与 h_n^j 作卷积,求得 $S_{2^{j+1}} f(x, y)$ 。(2)用 $S_{2^{j+1}} f(x, y)$ 的每一行与 g_n^j 作卷积,求得 $W_{2^{j+1}} f(x, y)$ 。(3)求取这一行的模极大值点。(4)用 $S_{2^{j+1}} f(x, y)$ 的每一列与 g_n^j 作卷积,求得 $W_{2^{j+1}} f(x, y)$ 。(5)求取这一列的模极大值点。(6)设置一阈值 T,滤除由噪声和微小细节生成的极值点。(7)对模极大值点重新置灰度值: $f(x, y) = 0$ 为边缘点; $f(x, y) = 255$ 为非边缘点。(8)在 h_n 和 g_n 系数间插入 $2^j - 1$ 个零值。(9)重复以上步骤,直到 $j=J$ 。

4 基于多分辨率分析的灰度调制影像融合方法

在此,以 SPOT 全色影像与 TM 多光谱影像融合为例。SPOT 全色影像的影像分辨率为 10m, TM 影像的分辨率为 30m,它可以理解为在当时成像条件下,在 10m 分辨率水平和 30m 分辨率水平上对地面连续信号的最佳逼近。对于 SPOT 影像和 TM 影像的融合,其实就是通过 SPOT 10m 分辨率水平上全色响应光谱段连续信号的最佳逼近和 30m 分辨率水平上多光谱响应光谱段连续信号的最佳逼近,来求 10m 分辨率水平上多光谱响应光谱段连续信号的最

佳逼近。

对 SPOT而言,在知道了 10m 分辨率的水平上全色波段信号的最佳逼近 (SPOT全色影像)以后,可以通过多分辨率分解求得在同等条件下 30m 分辨率的水平上全色波段信号的最佳逼近。

$$Y_{SPOT 10} = K_{SPOT 10}(\omega) X_{SPOT}(\omega) \quad (3)$$

在知道了式 (3)的情况下,通过一个三进制尺度函数低通滤波器 $H(\omega)$,使得:

$$K_{SPOT 30} = \sqrt{3}K_{SPOT 10}(3\omega) = H(\omega) \cdot K_{SPOT 10}(\omega) \quad (4)$$

此时:

$$Y_{SPOT 30}(\omega) = K_{SPOT 30}(\omega) X_{SPOT}(\omega) \quad (5)$$

$Y_{SPOT 30}(\omega)$ 为 30m 分辨率水平上全色波段信号的最佳逼近。那么 10m 分辨率的水平上全色波段信号的最佳逼近和 30m 分辨率的水平上全色波段信号的最佳逼近之比为 $\frac{1}{H(\omega)}$,即:

$$\frac{Y_{SPOT 10}(\omega)}{Y_{SPOT 30}(\omega)} = \frac{1}{H(\omega)} \quad (6)$$

而对 TM 影像,假设在同样成像条件和响应光谱段下有 10m 分辨率的水平上最佳逼近:

$$Y_{TM 10} = K_{TM 10}(\omega) X_{TM}(\omega) \quad (7)$$

通过对它进行多分辨率分解,可以获得 30m 分辨率水平上的逼近,而它就是获得的 TM 30m 分辨率影像,也就是通过一个同样的三进制尺度函数低通滤波器 $H(\omega)$,使得:

$$K_{TM 30} = \sqrt{3}K_{TM 10}(3\omega) = H(\omega) \cdot K_{TM 10}(\omega) \quad (8)$$

此时:

$$Y_{TM 30}(\omega) = K_{TM 30}(\omega) X_{TM}(\omega) \quad (9)$$

10m 分辨率的水平上全色波段信号的最佳逼近和 30m 分辨率的水平上全色波段信号的最佳逼近之比为 $\frac{1}{H(\omega)}$,即:

$$\frac{Y_{TM 10}(\omega)}{Y_{TM 30}(\omega)} = \frac{1}{H(\omega)} \quad (10)$$

此时,可以通过利用在同种成像条件下 10m 分辨率水平上的逼近和 30m 分辨率的水平上的逼近之比相等 (都等于 $\frac{1}{H(\omega)}$)这一关系,来求得 10m 分辨率的水平上多光谱响应光谱段的最佳逼近 $Y_{TM 10}$,即:

$$\frac{Y_{SPOT 10}}{Y_{SPOT 30}} = \frac{Y_{TM 10}}{Y_{TM 30}} = \frac{1}{H(\omega)} \quad (11)$$

从而:

$$Y_{TM 10} = \frac{Y_{SPOT 10}}{Y_{SPOT 30}} Y_{TM 30} \quad (12)$$

在上式中 $Y_{SPOT 10}$, $Y_{TM 30}$ 分别为原始 SPOT影像和原 TM 影像的频率域信号,为已知值,所以只要获得 $Y_{SPOT 30}$ 就可以求得 $Y_{TM 10}$,而求 $Y_{SPOT 30}$ 的关键是要知道 $H(\omega)$,因此整个问题的核心就是如何获得 $H(\omega)$,通过它求得 $Y_{SPOT 30}$ 。

以上是在频率域对融合的算法进行的理论介绍,小波低分辨率理论可以同时和时间域和频率域对信号进行处理,因此公式 (12)反映的融合算法可以在时间域进行等价的运算,此时参与运算的影像都应该调整到 SPOT10m 分辨率全色影像的尺度上。此时公式 (12)可以表示为:

$$TM_{10}^i(j, k) = \frac{SPOT_{10}^i(j, k)}{SPOT_{30}^i(j, k)} \cdot TM_{30}^i(j, k) \quad (13)$$

事实上,由多孔算法可知,在高分辨率影像 SPOT影像可以分解成 $1/3$ 分辨率下的逼近和该尺度下的小波面分量,即:

$$SPOT_{10}^i(j, k) = SPOT_{30}^i(j, k) + w_{SPOT 10}^i(j, k) \quad (14)$$

代入 (13)可得到:

$$\begin{aligned} TM_{10}^i(j, k) &= \left[1 + \frac{w_{SPOT 10}^i(j, k)}{SPOT_{30}^i(j, k)} \right] TM_{30}^i(j, k) \\ &= TM_{30}^i(j, k) + \frac{TM_{30}^i(j, k)}{SPOT_{30}^i(j, k)} w_{SPOT 10}^i(j, k) \end{aligned} \quad (15)$$

上式表达的融合方法就是基于多分辨率分析的灰度调制影像融合方法,具体流程如图 1所示。

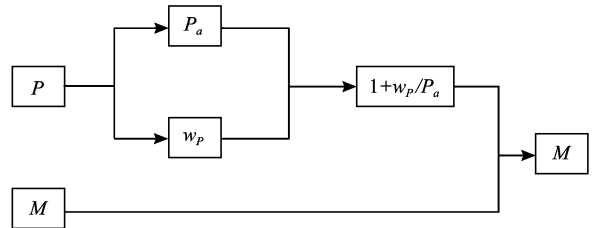


图 1 MRAGM 融合流程示意图

Fig 1 MRAGM fusion flow diagram

融合的步骤为:

(1)高分辨率全色影像 P 和低分辨率多光谱影像 M 几何配准,并把多光谱影像采样到和全色影像一样的大小;

(2)把全色影像按 $p_a = A * p$ 和 $w_p = p - p_a$ 分解成它的近似和小波面分量,并计算系数 $(1 + \frac{w_p}{P_a})$, $P = P_a + w_p$ (p 为影像, A 为 M 进制 a' Trous低通滤波器, p_a 为近似影像, w_p 为小波面分量)。

(3)用所获得的系数调制 $M(R, G, B)$ 通道获得结果图像。

$$\begin{cases} R_{\text{new}} = \left(1 + \frac{w_p}{P}\right) R \\ G_{\text{new}} = \left(1 + \frac{w_p}{P}\right) G \\ B_{\text{new}} = \left(1 + \frac{w_p}{P}\right) B \end{cases} \quad (16)$$

5 影像融合效果的评价^[8, 11, 13, 14]

融合后的图像,可以用目视判读。优点是直接,简单,可根据图像处理后的对比做出定性评价;缺点是主观性较强。一般地,对于遥感影像融合的效果评价,应综合考虑空间细节信息的增强域光谱信息的保持,本文采用定性定量相结合的方法。进行定性分析时,比较它们之间的色调区别和细节纹理的丰富程度,以此推断在高分辨率基础上的融合效果。为了客观定量评价融合效果,对融合图像可以用均值、均方差、中值、相关系数、平均小波能量来进行定量描述。当进行定量的比较两个图像时,首先会考虑到比较两个图像的直方图,均值、中值和方差是描述直方图的 3 个主要指标,相关系数则定量的描述两个图像的相似程度,因此对融合结果多光谱影像和原始多光谱影像的相似性的比较采用目视判读和均值、中值、方差、相关系数 4 个参数相结合的方法。由于平均小波能量能反映细节纹理信息的丰富程度,因此采用目视判读的方法与比较两组影像的平均小波能量作为衡量分辨率是否提高的一个指标。

(1) 相关系数

图像的相关系数反映了两幅图像的相关程度。通过比较融合增强前后的图像相关系数可以看出多光谱图像的光谱信息改变程度。第 k 个光谱分量融合前后的相关系数定义为:

$$C^{(k)} = \frac{\sum_{i,j} [(V_{ij}^{(k)} - \bar{e}^{(k)}) \times (V_{ij}^{(k)} - e^{(k)})]}{\sqrt{\sum_{i,j} [(V_{ij}^{(k)} - \bar{e}^{(k)})^2 \times \sum_{i,j} (V_{ij}^{(k)} - e^{(k)})^2]}} \quad (17)$$

式中, $\bar{e}^{(k)}$, $e^{(k)}$ 分别为第 k 个光谱分量融合前后的平均灰度值。平均相关系数定义为:

$$C = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K C^{(k)} \quad (18)$$

(2) 影像的平均小波能量

对小波平均能量进行分析时发现,因为小波信号表示的是高频信号,如果小波系数为 0,则表示了该像素无细节信号,小波系数越大,则表示了该像素为细节信号,因此小波平均能量是反映影像细节丰富程度的指标,它比平均梯度更能反映影像的分辨率及清晰度。由小波系数的定义可知,影像的平均小波能量值跟所选用的小波基有关。计算公式为:

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i, j)^2}{MN} \quad (19)$$

式中, M, N 为影像大小, w 为该影像的小波面分量。

6 仿真与结论

本文实验选用了武汉市某地区的 SPOT 全色影像和 TM 5, 4, 3 多光谱影像,图像大小为 182×182 , 如图 2 所示。

对这两幅影像分别利用 Mallat 算法, a'Trous 算法和基于多分辨率分析的灰度调制影像融合算法 (MRAGM) 进行融合。对 Mallat 算法采用的滤波器组为 Dauberchies 滤波器,长度为 4,融合结果如图 3(a) 所示,对 a'Trous 算法采用的滤波器为 a'Trous 滤波器,它是通过 Dauberchies 长度为 4 滤波器组中分解尺度滤波器和综合尺度滤波器卷积而得,是典型的具有紧支撑性的半带滤波器,融合结果如图 3(b) 所示,MRAGM 算法采用的滤波器与 a'Trous 方法中的滤波器,融合结果如图 3(c) 所示。

从目视判读的结果来分析,图 3(a), (b), (c) 之间没有明显的差异,但仔细看图 3(a),影像地物有一定模糊,还能看出由于相位变化引起的细微影像变形,后两者相比,图 3(b) 影像仍然有一定程度的模糊,地物的细节反映不充分,图 3(c) 中小纹理、小地物的信号更明显,色调更自然。

从表 1 可以得出下列结论:

(1) 原始的 TM 543 影像和放大后的 TM 543 影像的均值、均方差和中值保持了良好的一致性。

(2) 原始 TM 543 和三种算法的融合结果影像在总体上均值、中值没有显著的区别,但方差变化较大。

(3) Mallat 算法和 a'Trous 算法分别与原始 TM 543 在蓝色通道上的相关系数只有 75% 和 66%, 而和基于多分辨率分析的灰度调制影像融合算法的相关系数都在 94% 以上,具有相对较高的相似性。

(4) Mallat 算法与 a'Trous 算法所得融合影像的

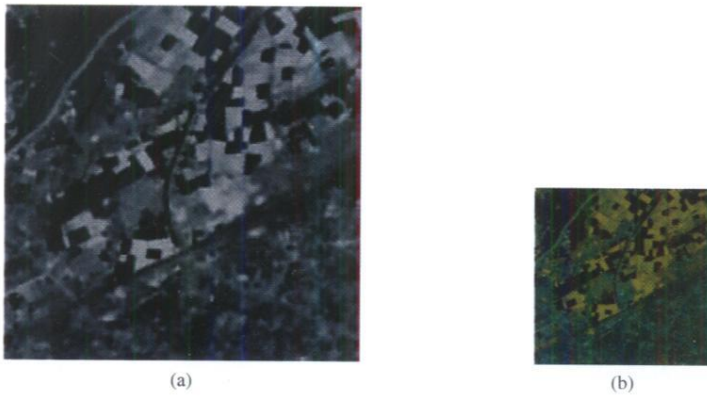


图 2 原始影像图

(a) 原始 SPOT 全色影像(尺度 1, 分辨率 10m); (b) 原始 TM5,4,3 影像(尺度 3, 分辨率 30m)

Fig.2 Original images

(a) Original SPOT panchromatic image; (b) Original TM5,4,3 image

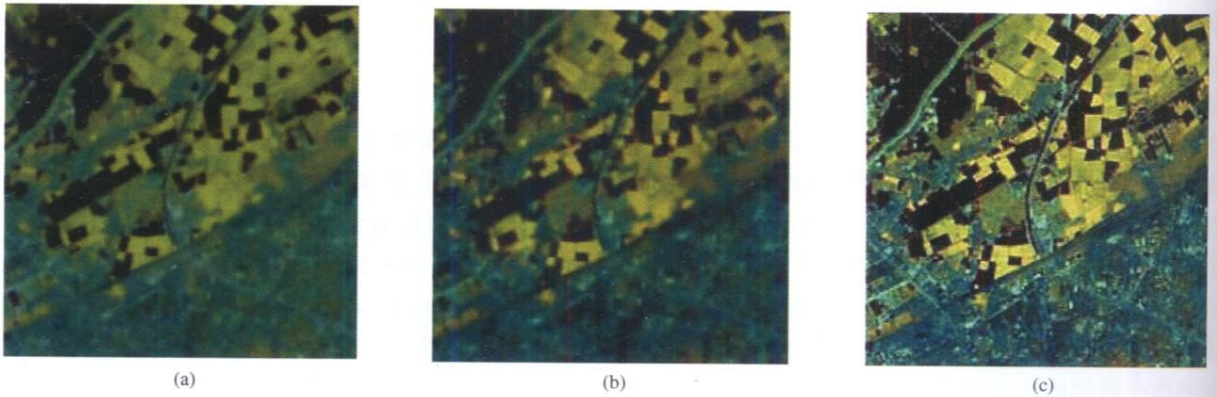


图 3 融合影像图

(a) 在 Mallat 算法下的融合结果图(相位失真,分辨率提高了,色调得到一定程度的保持);

(b) 在 a'Trous 算法下的融合结果图(细节信号明显增多,分辨率得到提高,色调保持到一定程度);

(c) 在 MRAGM 算法下的融合效果图(分辨率提高,色调保持,原始 SPOT 贡献了几何信息,原始 TM4,5,7 贡献了光谱信息)

Fig. 3 Fusion images

(a) Fusion image by Mallat algorithm; (b) Fusion image by a'Trous algorithm; (c) Fusion image by MRAGM algorithm

相关系数在 R 和 G 两通道上达到 87% 以上,而在 B 通道上仅为 68%; Mallat 算法和基于多分辨率分析的灰度调制影像融合算法的相关系数在 R 通道上达 84%,而在其他两个通道上为 76% 和 61%; a'Trous 算法和基于多分辨率分析的灰度调制影像融合算法的相关系数均大于 88%。

(5) 放大后的 TM5,4,3 影像因为细节损失,平均小波能量减低,融合后影像的平均小波能量都有显著提高,并且全面超过原始 TM5,4,3 影像的水平,可以推断融合结果影像的分辨率超过原始的 TM5,4,3 的分辨率,尤以 G、B 两个通道的平均小波能量增加最为明显。

通过分析表 1 的统计特性和目视判读的分析,并结合到 (SPOT-P 和 TM5,4,3) 所对应的波段范围

可以得出:

(1) 因为 SPOT-P 和 TM3 所反应的波段范围重合,所以融合时对 TM3 的影响比较大,使得 TM3 的平均小波能量增加较多,相关系数减低。

(2) Mallat 算法在融合中应用时,由于采用的正交滤波器不具有线性时不变特性,而且采用的塔式算法结构有二抽取和二插值过程,也使相位产生变化, Mallat 算法只有在采用原始数据的尺度分解数据重建时才不会产生相位变化。而在融合应用中,重建时的部分数据被替换了,所以相位产生变化。它本身的数据处理量大,内存负担较重,再综合目视分析,可以得出它在融合中应用时效果最差。

(3) Trous 算法具有线性时不变的特性,能够完全重建每一个像素而不带任何误差,并且无需内插。

表 1 原始 SPOT-P 影像和 TM 多光谱波段 5, 4, 3 影像融合的统计特性

Table 1 Statistic characteristic of fusion images with original SPOT-P image and TM 5, 4, 3

评价指标		原始 TM 5, 4, 3	放大的 TM 5, 4, 3	SPOT-P	融合结果 (Mallat算法)	融合结果 (a'Trous算法)	融合结果 (MRAGM 算法)
均值	R	150.21	150.11	140.95	150.01	149.94	149.64
	G	136.10	135.96		136.28	136.36	136.14
	B	68.52	68.31		68.70	68.62	68.44
均方差	R	60.15	60.23	43.86	60.84	60.61	60.48
	G	36.85	36.87		39.52	39.68	39.88
	B	12.53	12.52		17.85	17.63	15.51
中值	R	152	151	137	152	153	151
	G	139	140		141	140	140
	B	63	64		65	66	64
与放大的 TM 5, 4, 3 影像的相关系数		R			0.97	0.98	0.98
		G			0.95	0.95	0.96
		B			0.75	0.66	0.94
与 Mallat算法融合影像的相关系数					R	0.89	0.84
					G	0.87	0.76
					B	0.68	0.61
与 a'Trous算法融合影像的相关系数					R	0.95	0.95
					G	0.91	0.91
					B	0.88	0.88
小波能量均值	R	0.4116	0.0536	0.3354	0.4265	0.4328	0.4598
	G	0.2049	0.0354		0.2501	0.2553	0.2863
	B	0.0349	0.0068		0.2019	0.2143	0.2258

但是因为在每一通道上都加了一个相同的小波面分量,所以影像有趋灰的趋势,影像的饱和度降低。在此实验中表现为相关系数的降低,蓝通道的表现特别明显。

(4)MRAGM 算法简单实用,每一个通道的增加量和同尺度上的高分辨率影像与低分辨率影像的灰度比相关,因此保持了 R, G, B 三通道的灰度比不变,所以在平均小波能量提高的同时仍能保持较高的相关系数。它在分辨率提高的同时,色调保持不变。显然,这种方法比前两种方法的融合效果要好。

参考文献 (References)

[1] Pohl C, Van Genderen J L. Multisensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods, Application [J]. Int J Remote Sensing, 1994, 19(5): 362-367.

[2] Li H, Manjunath B S, Mitra S K. Multisensor Image Fusion Using the Wavelet Transform [J]. Graphical Models and Image Processing, 1995, 57(3): 235-245.

[3] Zhong Zhang, Blum R S A. Categorization of Multiscale-decomposition-based Image Fusion Schemes with a Performance Study for a Digital Camera Application [J]. Proceeding of the IEEE, 1999, 87(8): 1305-1326.

[4] David A. Yocky. Multi-resolution Wavelets Decomposition Image Merge of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(9): 1067-1074.

[5] Jo Yew Tham, Shen Luan Lee et al. A General Approach for Analysis and Application of Discrete Multiwavelet Transforms [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2000, 48(2): 457-464.

[6] Chao R, Zhang K. An Image Fusion Algorithm Using Wavelet Transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(5): 750-754.

- 753 [晁锐,张科. 一种基于小波变换的图像融合算法 [J]. 电子学报, 2004, **32**(5): 750—753.]
- [7] Liu J L, Li J. Multi-Source Remote Sensing Image Data Fusion [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, **12**(1): 47—50 [刘继琳,李军. 多源遥感影像融合 [J]. 遥感学报, 1998, **12**(1): 47—50.]
- [8] Bruno Garguet-duport, Jachy G irel, Jean-Marc Chassery, et al. The Use of Multi-resolution Analysis and Wavelets Transform for Merging SPOT Panchromatic and Multi-spectral Image Data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, **62**(9): 1057—1066.
- [9] David A. Yocky. Image Merging and Data Fusion by Means of the Discrete Two-dimensional Wavelet Transform [J]. *J. Opt Soc Am A*, 1995, **12**(9): 1834—1841.
- [10] Wang Z J, Li D R, Li Q Q. Image Fusion with Wavelets Analysis [J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying And Mapping*, 2000, **25**(2): 137—141. [王智均,李德仁,李清泉. 利用小波变换对影像进行融合的研究 [J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, **25**(2): 137—141.]
- [11] Qiu Z C. A Research of Data Merging for Remote Sensing Image [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographic Sinica*, 1990, **19**(4): 290—297. [邱志成. 遥感图像数据复合方法的研究 [J]. 测绘学报, 1990, **19**(4): 290—297.]
- [12] Shao J L. *Wavelet Theory, Image Analysis and Target Recognition* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1998. [邵巨良. 小波理论、影像分析与目标识别 [M]. 北京: 测绘出版社, 1998.]
- [13] Xia M G, He W. Overview of Wavelet-analysis-based Image Fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 177—180. [夏明革,何文. 基于小波分析的图像融合评述 [J]. 红外与激光工程, 2003, **32**(2): 177—180.]
- [14] Li K L, Wang X. Information Fusion Method of Wavelet Transformation and Evaluation [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1999, (4): 46—52. [李克鲁,王霞. 小波变换的信息融合方法及结果评价 [J]. 国土资源遥感, 1999, (4): 46—52.]