

多进制小波理论在 SPOT 和 TM 影像融合中的应用

王智均¹ 李德仁¹ 李清泉²

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学空间信息与网络通信技术研发中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 二进制小波不适合融合 SPOT 全色影像和 TM 多光谱影像; 三进制下的 Mallat 算法对 SPOT 全色影像和 TM 多光谱影像进行融合时, 由于存在抽取和插值运算, 使得融合的结果存在相位失真。为了克服相位失真, 本文采用了多进制下的 MRAGM 算法。试验表明, 它能有效地用于融合 SPOT 全色影像和 TM 多光谱影像, 实现它的关键是构建具有紧支撑特性的 M 进制低通尺度函数滤波器。

关键词: 多进制小波; 融合; MRAGM 算法

中图法分类号: TP751

人类的信息活动可以抽象为获取数据、提取信息、上升为知识和决策控制等几个阶段(李圣怡等, 1998)。影像融合是数据融合的一种形式, 进入 90 年代, 它成为国际遥感界研究的主要问题之一。它可以定义为: 通过一个数学模型, 把来自不同传感器的影像综合成一幅满足特定应用需求的影像的过程。遥感应用的许多研究工作表明, 把高分辨率影像和多光谱影像融合起来, 可以有效地把这两种不同传感器的优点结合在一起, 提高了对影像的信息分析和提取能力。

融合算法的发展大体经过了 3 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现在基于小波的影像融合方法。小波影像融合方法通常基于二进制小波 Mallat 算法和 \hat{a} trous 算法, 其原理是: 用 TM 多光谱影像的低频信号部分替换 SPOT 全色影像的低频部分, 然后把重新组合的频率域信号反变换到时间域, 便得到融合的结果影像。但是 SPOT 全色影像和 TM 多光谱影像的分辨率之比为 1:3, 用二进制小波融合的效果并不好。最近朱长清(2000)利用三进制下的 Mallat 算法对 SPOT 全色影像和 TM 多光谱影像进行了融合, 但是由于存在抽取和插值运算, 使得融合的结果影像包含相位失真; 王智均(2000)介绍了多进制下的 MRAGM 方法, 它适合处理任意整数分辨率之比的融合情况。本文将采用该方法来融合 SPOT 全色影像和 TM 多光谱

影像, 实现它的关键是构建具有紧支撑特性的 M 进制低通尺度函数滤波器。

1 多进制小波理论基础

多进制小波可以理解为频率域的分解问题, 区别于二进制小波把频率域分解成 2 个通道, M 进制小波把频率域分解成 M 个通道。图 1 表示理想情况下的频率域 M 通道分解。 M 通道理想滤波器组理论包含了如何去设计 $h_i(n)$ 和 $g_i(n)$ ($i \in \{0, 1, \dots, M-1\}$), 使得 $y(n) = x(n)$, 即理想完全重建理论。完全重建条件下的理想滤波器组等价于 $\sum_i \sum_n h_i(Mn + n_1) \circ g_i(Mn - n_2) = \delta(n_1 - n_2)$, 而标准滤波器组为满足 $g_i(n) = h_i(-n)$ 完全重建条件下的理想滤波器组。标准尺度滤波器组是满足 $\sum_k h_0(k) \circ h_0(Ml + k) = \delta(l)$ 和 $\sum_k h_0(k) = \sqrt{M}$ 的 $h_0(n)$ 序列; 标准小波滤波器组是所有的 $h_i(n)$ 序列, 使得 $h_0(n)$ 和 $h_i(n)$ 构成标准滤波器组。

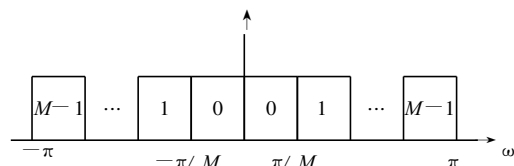


图 1 多进制小波的构造

Fig. 1 M -band Ideal Frequency Domain Decomposition

2 多进制小波的构造

多进制小波的构造较二进制小波复杂。在二进制情况下,知道了尺度函数以后就可以推导出相应的小波函数,而在多进制情况下,则有 $M-1$ 个小波函数,它们不能由尺度函数惟一确定。Steffen (1993)给出了具有 k 次正则性的 M 进制小波尺度函数滤波器的构建公式(1),它非常类似于 Daubechies 推导的二进制小波尺度函数滤波器的构建公式:

$$H_0(z)=[\frac{1+z^{-1}+...+z^{-(M-1)}}{M}]^KQ(z) \quad (1)$$

可以求 $Q(z)$,使得满足式(1)的 $H_0(z)$ 是一个标准尺度滤波器。由式(1)可知,当滤波器长度 $N=MK$ 时, $Q(z)$ 是 $K-1$ 次 z^{-1} 的多项式,因此, $z^{K-1}Q(z)Q(z^{-1})$ 就是 $2K-2$ 次关于 z 的多项式。假设

$$z^{K-1}Q(z)Q(z^{-1})=\sum_{i=0}^{2K-2}p(i)(z-1)^i \quad (2)$$

因此,求 $H_0(z)$ 的问题又转化为在归一化条件下求 $p(i)(i \in [0, \cdots, 2K-2])$ 的问题。在知道了 $p(i)$ 后, $Q(z)$ 可以通过因式分解求得,再把 $Q(z)$ 代入式(1)便得到 $H_0(z)$ 。这种方法的优点是可以得到 $p(i)$ 的解析表达式为:

$$p(i)=(2K-1-i)\sum_{l=0}^{2K-2-i}\binom{2K-2-i}{l}(-1)^{i-l}B_{l+1}, i \in \{0, \cdots, 2K-2\} \quad (3)$$

$$B_{l+1}=\frac{M}{(2K-1)!}\prod_{k=1}^{K-1}(l^2-k^2M^2) \quad (4)$$

所以当 $K=2, M=3$ 时,有:

$$h_0(n)=\{0.338\ 4, 0.530\ 8, 0.723\ 2, 0.239\ 0, 0.046\ 5, -0.145\ 9\}$$

利用它可以把一幅图像分解成同尺度分辨率为原始图像 $1/M$ 的近似影像 Ax 和小波面分量 w ,图 3 表示了该分解过程。

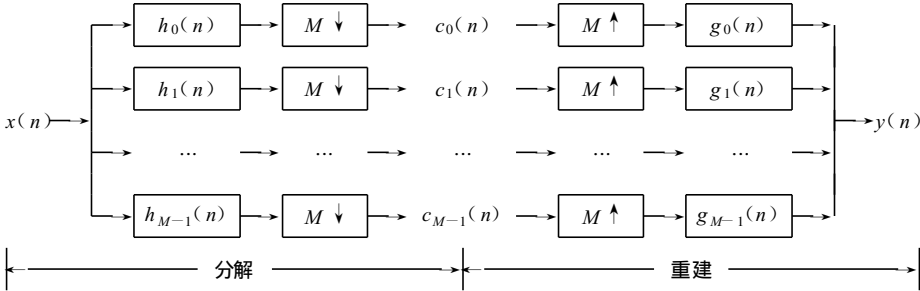
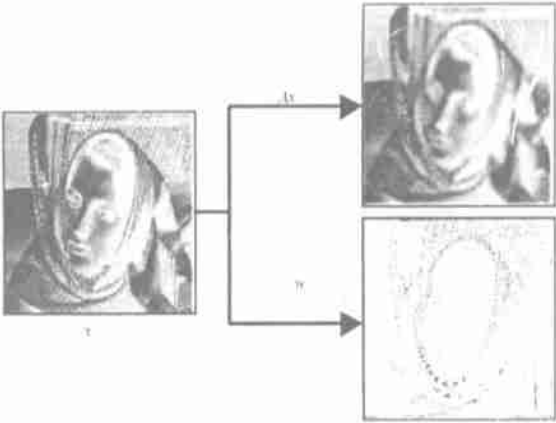


图 2 M 通道滤波器组对信号的分解和重建过程
Fig. 2 The Procedure of Signal Analysis and Reconstruction by M-band Filters



3 基于多分辨率分析的灰度调制融合方法(M RAGM)

基于小波系数调制的融合方法和基于加法的多孔小波融合算法(李军, 1999)的区别在于获得分解的近似影像 a 和小波分量 w 以后,不是直接把小波分量和红、绿、蓝通道相加,而是利用小波分量和近似分量相除所得的值作为调节系数来调节该像元的灰度值,公式如下:

$$R_{new} = R_{old} + \frac{w}{a}R_{old}$$

$$G_{new} = G_{old} + \frac{w}{a}G_{old}$$

$$B_{new} = B_{old} + \frac{w}{a}B_{old}$$

它的特点是保持了每一像元的红、绿、蓝之比,色调没有改变,即 $R_{new} : G_{new} : B_{new} = R_{old} : G_{old} : B_{old}$ 。这样的结果影像能保持原来 TM 影像的光谱特

图 3 原始图像 x 和它的同尺度 $1/3$ 分辨率下的近似影像 Ax 和小波面分量 w
Fig. 3 Original Image and Its Approximate Image and Wavelets Component at Same Scale and $1/3$ Resolution

性不变,避免了传统融合方法对光谱特性的影响,从而可以提高对地物的判读精度。该方法和朱长清(2000)的方法相比,算法更简单,而且由于采用了基于 $h_0(n)$ 的具有紧支撑特性的线性相位滤波器,因而不会引起相位失真。

4 试验与结论

本文用广东肇庆市的 10m 分辨率的 SPOT-P 影像和 TM5、4、3 多光谱影像,SPOT 影像大小为 600 像素×555 像素,对应的 TM5、4、3 影像大小为 200 像素×185 像素。该组影像的特点是:有水体,SPOT 影像中纹理清晰,地块边界明显,右下部分具有很多小地物,而对应的 TM5、4、3 中则没有这些小地物,有助于评价融合效果。在实践中,对融合结果的评价通常采用定性分析和定量分析的方法,目视判读仍然是简单有效的定性分析方法。定量分析的方法也很多,常用的有比较融合影像和低分辨率多光谱影像的辐射统计参数均值、均方差、平均梯度和偏差指数、熵和影像间的相关系数等(李军,1999),但是到现在为止,还没有比较令人满意的针对影像融合的评价方法。本文为了能有效地解决融合结果的评价问题,采用比较两组影像的平均小波能量来反映细节纹理信息的丰富程度,以此作为衡量分辨率是否提高的一个指标,而对多光谱特性的评价,通过综合比较融合结果影像和原始多光谱影像的辐射统计参数均值、均方差、中值和影像间的相关系数来衡量。

影像的平均小波能量用下式来求解:

$$\overline{w} = [\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i, j)] / (MN)$$

从对图 4(c)的目视判读效果看,融合结果影像的分辨率明显提高,色调和 TM5、4、3 一致,道路等线性信息非常清晰。从表 1 的统计结果可以得出,融合结果影像在总体上均值和中值没有显著区别,但方差变化较大,融合结果的相关系数都超过 91%,具有相对较高的相似性。放大后的 TM5、4、3 平均小波能量减低,融合后影像的平均小波能量都有显著的提高,绿、蓝通道超过原始 TM5、4、3 的水平,可以推断融合结果影像的分辨率在绿、蓝通道超过原始 TM5、4、3 的分辨率。因为 SPOT-P 和 TM3 所反映信息的波段范围重叠,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,相关系数减小。

表 1 SPOT 全色波段和 TM5、4、3 影像融合统计特性
Tab. 1 The Statistics Characteristic Comparison of SPOT-P, TM5、4、3 and Its Fused Result

		原始 TM5、4、3	放大的 TM5、4、3	SPOT-P	融合结果 (MRAGM)
均 值	红	150.41	150.31		149.76
	绿	137.10	136.96	141.82	137.14
	蓝	69.52	69.31		69.44
均方差	红	60.26	60.48		60.88
	绿	37.85	37.87	44.02	39.88
	蓝	13.53	13.52		15.02
中 值	红	154	154		152
	绿	141	141	132	139
	蓝	66	65		65
与放大的 TM、5、4、3 影像的相 关系数	红				0.98
	绿				0.95
	蓝				0.91
小波能 量均值	红	0.422 9	0.053 2		0.309 6
	绿	0.203 0	0.032 3	0.323 6	0.281 6
	蓝	0.030 8	0.007 4		0.072 0

多进制被引入到影像融合中之前,多进制的情况都是用二进制的算法来近似的。通过分析比较,分别用二进制小波 MRAGM 算法和多进制小波的 MRAGM 算法来解决分辨率之比为 1:3 的融合问题,就可以得出是否可以用二进制小波来近似多进制小波的情况。图 4(d)是利用分解水平为 2 的 MRAGM 算法的融合结果,和图 4(c)比较,从目视效果上看,有模糊感,有些方向小的线性地物和小纹理消失了,而有些方向的线性地物又太突出。表 2 描述了两个图像之间统计特性的比较。从统计特性上看不出有明显的差别,二进制情况下的系数稍稍超过了多进制的情况,似乎和理论分析不吻合,其原因是二进制的平均小波能量统计的是归一化频率域 $[\pi/4, \pi]$ 之间的高频能量,而三进制统计的是 $[\pi/3, \pi]$ 之间的高频能量,因此,经过综合定量和定性分析可以得出,用多进制处理分辨率之比为 1:3 的效果远比用二进制近似的效果好。

从以上分析可以得出,MRAGM 算法简单实用,每一个通道上的增加量和同尺度上高分辨率影像和低分辨率影像的灰度比相关,因此保持了红、绿、蓝三通道的灰度比不变,因此在平均小波能量提高的同时仍能保持较高的相关系数。SPOT 和 TM 影像的分辨率之比为 1:3,所以用多进制处理效果比用二进制近似的效果好。

- Wavelets December' 93, 1993
- 11 Pohl C, van Gendern J L. Multi-Sensor Image Fusion in Remote Sensing: Concepts, Methods and Applications. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, 19(5): 823~854
 - 12 Koilpillai R D, Vaidyannathan P P. Cosine-modulated FIR Filter Banks Satisfying Perfect Reconstruction. *IEEE Trans. on SP.*, 1992, 40(4): 770~783
 - 13 Chan S C, Luo Y, Ho K L. M -channel Compactly Supported Biorthogonal Cosine-modulated Wavelet Bases. *IEEE Trans. on SP.*, 1998, 46(4): 1 142~1 151
 - 14 Nguyen T Q, Koilpillai R D. The Theory and Design of Arbitrary-length Cosine-modulated Filter Banks and Wavelets Satisfying Perfect Reconstruction. *IEEE Trans. on SP.*, 1996, 44(3): 473~483
 - 15 Wald L, Ranchin T, Mangolini M. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. *PE & RS*, 1997, 63: 691~699
 - 16 Wang Z J, Li D R. A Image Fusion Method: Improve the Spatial Resolution while Preserve the Color. The 20th Asian Conference on Remote Sensing, Hong Kong, 1999
 - 17 Wang Z J, Li D R, Li Q Q. A Introduction to Multi-resolution Based Grey Modulation Image Fusion Method. *CPGIS' 2000*, Monterey, USA, 2000
 - 18 Wisutmethangoon Y, Nguyen T Q. A Method for Design of M th-band Filters. *IEEE Trans. on SP.*, 1999, 47(6): 1 669~1 678
-
- 作者简介: 王智均, 博士生。现从事遥感影像处理、GIS 和摄影测量等研究。
E-mail: zjwang@wtusm.edu.cn

Fusion of SPOT-P and TM Multispectral Image by M -band Wavelet Theory

WANG Zhijun¹ LI Deren¹ LI Qingquan²

- (1 National Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)
- (2 The Research and Development Center of Spatial Information and Network Communication, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: Image fusion algorithms have evolved from traditional image fusion method, pyramid based method to nowadays wavelet based image fusion methods. The current wavelet based fusion algorithms are based on Mallat algorithm and à trous algorithm, and it deals with dyadic wavelet theory. The fundamental principle of those algorithms are: in frequency domain, substituting high resolution panchromatic image's low pass half band frequency with TM multi-spectral image's frequency, and then using invert Fourier transform to get fused image. But as the resolution ratio between SPOT PAN and TM image is 1:3, it is not proper to use dyadic wavelet to solve this fusion problem. Zhu C Q has reported his research which is based on M -band theory, but M -band Mallat algorithm will lead to phase distortion in image fusion process. Wang Z J (2000) introduced MRAGM algorithm which is also based on M -band theory and can deal with any integer ratio of two images. This paper explains how to use MRAGM algorithm to fuse SPOT-P and TM-M. The result shows MRAGM improves the spatial resolution of multi-spectral images while keeps the hue unchanged. The key problem to use this algorithm is to design compactly supported K -regularity M -band scale function filter.

Key words: M -band wavelet theory; image fusion; MRAGM algorithm